Г. К. Жерве

ОБМОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

ОСНОВЫ УСТРОЙСТВА, ТЕОРИИ И РАБОТЫ



Ленинград
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
Ленинградское отделение
1989

ББК 31.26-04
Ж59
УДК 621.313.045

Рецензенты *В. В. Фетисов, Я. Б. Данилевич*

Редактор *Л. М. Пархоменко*

Жерве Г. К.

Ж59 Обмотки электрических машин. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. — 400 с.: ил.
ISBN 5-283-04458-0

Рассмотрены пазы статора и ротора, в которых находятся обмотки электрических машин. Даны типы обмоток. Изложен процесс индуктирования ЭДС в обмотках и создание МДС обмотками. Приведены меры борьбы с вихревыми токами. Отдельно рассмотрены обмотки с дробными числами пазов, некоторые специализированные виды обмоток переменного тока и обмотки постоянного тока.

Для инженерно-технических работников, специализирующихся в области расчета, конструирования, эксплуатации, исследования и ремонта электрических машин.

Ж $\frac{2202070100-119}{051(01)-89}$ 137—89 ББК 31.26-04

ISBN 5-283-04458-0

ПРЕДИСЛОВИЕ

Многолетний опыт работы в области электромашиностроения показывает, что зачастую специалисты этой отрасли, особенно молодые, испытывают затруднения в вопросах устройства, теории и работы обмоток электрических машин. Между тем недостаточное внимание к этой наиболее сложной и наиболее уязвимой части электрической машины, которая без всякого преувеличения практически полностью определяет качество машины и ее поведение во время работы, способно привести и действительно приводило неоднократно к тяжелым авариям даже наиболее крупных машин. Правда, эти аварии большей частью не носят характера внезапной катастрофы, но тем не менее требуют крупного ремонта или даже реконструкции обмотки, а иногда и машины в целом, что всегда связано с большими материальными затратами.

Причиной этого, с одной стороны, является невозможность уделить обмоткам достаточное внимание в учебных курсах из-за общей перегруженности учебных программ, а с другой — отсутствие систематических руководств в данной области. Между тем необходимость в таких руководствах всегда ощущалась, свидетельством чего нужно считать создание таких капитальных трудов в области обмоток, как книги Е. Арнольда, Р. Рихтера, М. Лившица-Гарика, а в более близкое нам время — Я. Кучеры и Й. Гапля. Однако эти издания уже не отражают современного состояния данного вопроса, так как и электромашиностроение в целом, и техника обмоточного производства в частности, оказывающая чрезвычайно заметное влияние на типы и формы обмоток электрических машин, значительно изменились.

Что касается отечественной литературы, то существующие в настоящее время книги по обмоткам электрических машин ориентированы на средний и младший технический персонал и посвящены в большей степени техническому выполнению обмоток, нежели их теории и критическому рассмотрению устройства, а число статей в периодической печати незначительно и, как правило, они рассматривают узко ограниченные вопросы.

Задачей настоящей книги является восполнить этот пробел с учетом современных решений, особенно в области крупного энергетического электромашиностроения, достигшего в последние десятилетия значительных успехов. При этом вопросам технологии и материаловедения в области обмоток уделяется внимание только в той степени, в которой они могут влиять на устройство обмоток и вытекающие из него электрические и электромагнитные свойства.

Существует мнение, что руководство по обмоткам должно содержать готовые схемы, которые в крайнем случае могут быть подправлены и приняты к исполнению. И действительно, некоторые из капитальных трудов в значительной степени являлись скорее альбомами типовых схем, нежели руководствами по уст-

ройству, теории и работе обмоток. Однако никакой альбом не в состоянии быть исчерпывающим, так как разнообразие схем со всеми возможными их вариантами практически беспредельно. Вместо этого данная книга ставит себе целью дать такие сведения об обмотках, которые позволили бы составлять любую схему и при этом отчетливо представлять те свойства, которыми будет обладать обмотка.

При такой постановке вопроса и ограниченности объема книги очень важно очертить границы рассматриваемых вопросов, особенно когда дело касается самого сердца электрической машины — ее обмотки, теснейшим образом связанной со всеми прочими ее частями, в первую очередь активными. В качестве такой границы здесь принят переход от магнитодвижущей силы к создаваемой ею индукции магнитного поля; за ним открывается широчайшее поле вопросов, охватить которые в достаточной степени мог бы только многотомный труд.

Все рассматриваемые здесь вопросы иллюстрируются самыми простыми примерами, однако достаточными для детального изучения; во многих случаях такие примеры сами по себе не могут быть реальными схемами обмоток, но переход к действительным исполнениям неизменно является только количественным при полной строгости качественного рассмотрения вопроса.

Как правило, в книге рассматриваются наиболее общепринятые современные формы обмоток, но не различные частные случаи и специализированные исполнения, век которых большей частью очень ограничен; но наряду с этим достаточное внимание уделено тем формам, которые в прошлом являлись доминирующими: история техники учит, что нередко приходится возвращаться к формам, которые, казалось бы, изжили себя.

Приводимый список литературы, разделенный по главам книги, отнюдь не претендует на исчерпывающую полноту; в него включены источники, которые рассматривают данный вопрос либо более подробно, чем это представлялось возможным сделать в книге, либо с других позиций. Поэтому некоторые источники упоминаются в нем более одного раза.

Автор приносит благодарность рецензентам — профессору, доктору технических наук В. В. Фетисову и члену-корреспонденту АН СССР Я. Б. Данилевичу за ряд полезных советов, а также Центральному правлению Научно-технического общества энергетики и электротехнической промышленности за помощь, способствовавшую выпуску этой книги.

Замечания и пожелания по книге просьба направлять по адресу: 191065, Ленинград, Д-65, Марсово поле, д. 1, Ленинградское отделение Энергоатомиздата.

Автор

Глава первая

ЭЛЕМЕНТЫ УСТРОЙСТВА ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

1.1. ФОРМЫ ПАЗОВ

Обмотки якорей электрических машин укладываются в пазы, расположенные на активной поверхности этих якорей; так же выполняются и обмотки возбуждения неявнополюсных синхронных машин и некоторые другие виды обмоток. Такой способ укладки выработался еще на заре развития электромашиностроения — практически с момента перехода от беспазовой кольцевой обмотки якоря к барабанной и нашел повсеместное применение, так как дает ряд очевидных преимуществ:

во-первых, обмотка, уложенная в пазы сердечника, механически скреплена с ним несравненно надежнее, чем наложенная на гладкую поверхность и в лучшем случае приклеенная к ней;

во-вторых, укладка обмотки на поверхность гладкого якоря вынуждает иметь между этой поверхностью и поверхностью противоположной части машины, например индуктора, очень большой немагнитный промежуток, что вызывает увеличение расхода проводниковых материалов на обмотку возбуждения;

в-третьих, активные стороны обмотки, уложенной в пазы, гораздо лучше защищены от механических повреждений, например при сборке и разборке машины, нежели при гладком якоре;

наконец, в случае ремонта обмотки, уложенной в пазы, обычно бывает достаточно извлечь из них только сравнительно небольшую часть обмотки, а при гладком якоре это грозит ее полным развалом.

Сюда следует добавить и то, что в машинах переменного тока якорь, как правило, является наружной частью машины и несет обмотку на своей внутренней поверхности; если наложение обмотки на наружную поверхность гладкого якоря машины постоянного тока уже сопряжено с определенными трудностями по закреплению обмотки, то при наложении ее на внутреннюю поверхность эти трудности многократно возрастают; впрочем, последнее обстоятельство смогло выясниться только тогда, когда в результате изобретения асинхронного двигателя промышленное применение переменного тока получило решающий перевес над постоянным током. Нелишне напомнить, что к этому времени — началу девяностых годов прошлого века машины постоянного тока успели уже приобрести достаточно установившиеся формы;

если они и были еще далеки от совершенства, то все же вполне наметились пути их дальнейшей эволюции, чего нельзя было сказать о машинах переменного тока.

Как известно, в последние годы идея гладкого якоря вновь извлечена из прошлого и стала находить применение в некоторых специальных исполнениях машин постоянного тока благодаря ряду присущих ей достоинств; в машинах переменного тока ей, вероятно, будет принадлежать известное будущее в связи с развитием глубокого охлаждения, а пока ее можно рассматривать как некую абстракцию, удобную при исследовании ряда вопросов теории обмоток, что и будет в дальнейшем применяться.

Между устройством обмоток и очертаниями пазов, в которые они уложены, существует теснейшая связь; поэтому целесообразно прежде всего рассмотреть формы этих пазов, которые можно разделить на следующие три основные группы:

1. Пазы круглой формы.
2. Пазы с параллельными плоскими боковыми стенками, более или менее приближающиеся к прямоугольной форме.
3. Пазы с непараллельными плоскими боковыми стенками, приближающиеся к трапециевидной форме. Как правило, угол между этими стенками выбирается с таким расчетом, чтобы толщина зубцов между пазами сохранялась неизменной на протяжении большей части их высоты.

Дальнейшая классификация форм пазов определяется степенью их открытия; здесь различаются следующие четыре вида:

а) *закрытые* пазы, не имеющие выхода внутренней полости паза на активную поверхность сердечника;

б) *полузакрытые* пазы, у которых полость паза выходит на поверхность сердечника через относительно узкую щель или, как ее называют, *шлиц;*

в) *открытые* пазы с шириной выхода на активную поверхность, равной ширине паза поблизости от этой поверхности;

г) *полуоткрытые* пазы, занимающие промежуточное положение между полузакрытыми и открытыми. Они характеризуются, с одной стороны, тем, что ширина их отверстия близка примерно к половине ширины самого паза, а с другой — несимметричностью очертаний: отверстие паза в них смещено в сторону одной из стенок.

Все эти четыре вида пазов могут сочетаться с тремя основными формами не в одинаковой степени. Так, пазы круглой формы могут быть только либо закрытыми, либо полузакрытыми; пазы с непараллельными стенками помимо этого могут быть еще и открытыми; и лишь пазы с параллельными стенками встречаются любого вида по степени открытия.

Степень открытия паза определяет способы укладки обмотки и ее закрепления в пазу. Совершенно ясно, что в закрытый паз обмотка может быть вдвинута только сбоку, а в открытый паз она всегда может быть беспрепятственно заложена со стороны активной поверхности. Что касается полузакрытого паза, то в отношении укладки обмотки он не отличается от закрытого, если размеры поперечного сечения проводников обмотки больше ширины отверстия паза; если же они меньше этой ширины, то появляется возможность вводить проводники обмотки со стороны активной поверхности, если и не все сразу, как в открытый паз, то хотя бы поочередно. Нечто подобное имеет место и для полуоткрытого паза.

Несколько иначе обстоит дело с закреплением обмотки в пазу. Необходимость закрепления очевидна в случае открытого паза, поскольку без него обмотка так же легко может выйти из паза, как легко быть в него заложена. Примерно то же самое относится к полузакрытым пазам при размерах поперечного сечения проводников, меньших ширины отверстия паза; тем более это распространяется на полуоткрытые пазы, специально предназначенные для укладки обмотки через отверстие паза, хотя и по частям. Но при полузакрытых пазах с проводниками, не могущими пройти через отверстие паза, а тем более при закрытых пазах необходимость принятия специальных мер для закрепления обмотки не всегда очевидна. Однако задача закрепления обмотки в пазу состоит не только в предотвращении ее выпадения через отверстие паза, но еще и в том, чтобы она не могла вибрировать внутри паза, а тем более перемещаться внутри него в осевом направлении. С учетом этого закрепление обмотки в пазу необходимо практически во всех случаях.

Основным средством для закрепления обмотки в пазах являются *пазовые клинья* соответствующего профиля, в основном из твердых изоляционных материалов, но в отдельных случаях также и металлические. Для закрепления обмоток на вращающихся частях машин применяются *бандажи*, металлические и неметаллические; те и другие более подробно рассматриваются ниже.

Пазы круглой формы, закрытые и полузакрытые, в настоящее время применяются почти исключительно для короткозамкнутых обмоток из массивных стержней круглого сечения, главным образом неизолированных, на роторах асинхронных машин и в полюсных наконечниках синхронных машин. Диаметр этих стержней выбирается с таким расчетом, чтобы они могли быть забиты в пазы с торцов, однако без обдирания краями паза. Различие между закрытыми и полузакрытыми пазами состоит в том, что перемычка из материала сердечника, закрывающая паз и отделяющая его от активной поверхности данной части машины, или так называемый *мостик*, при относительно небольших значениях токов в стержнях обмотки хорошо проводит поток рассеяния паза и этим увеличивает индуктивное сопротивление обмотки; однако при дальнейшем увеличении тока она более или менее быстро насыщается, и тогда ее наличие перестает отражаться на индуктивном сопротивлении — закрытый паз в электромагнитном отношении как бы превращается в полузакрытый. У этого последнего пропорциональность между током и потоком рассеяния сохраняется лучше, особенно при относительно малых значениях тока;

поэтому закрытые пазы круглой формы применяются реже полузакрытых, и именно тогда, когда является желательным указанное выше их свойство. В настоящее время почти единственным местом их применения являются короткозамкнутые обмотки в наконечниках явновыраженных полюсов, крайние пазы которых выполняются закрытыми; лежащие в них стержни склонны нагружаться более значительными токами, нежели стержни в прочих пазах, и некоторое увеличение индуктивного сопротивления способствует более равномерному распределению токов.

Помимо плотности посадки, стержни в таких пазах удерживаются на своих местах массивными короткозамыкающими кольцами или шинами, и в относительно коротких машинах этого обычно вполне достаточно. Но чем машина длиннее, тем труднее забивать стержни в пазы; в результате в более длинных машинах трудно обеспечить достаточную плотность их посадки, возникает возможность вибрации стержней и в конечном итоге — разрушения от усталостных явлений. При полузакрытых пазах с этим можно бороться посредством расчеканивания стержней через отверстие паза, что при закрытых пазах, очевидно, исключено.

Для укладки обмоток, состоящих из многих проводников с относительно малыми размерами поперечного сечения, круглые пазы в настоящее время почти совершенно не применяются; исключение составляют лишь обмотки якорей самых малых машин и изредка — статорные обмотки генераторов повышенной частоты относительно небольшой мощности.

Наиболее обширное применение находят пазы с параллельными стенками, которые, как было указано выше, могут иметь любую степень закрытия. Однако и среди них закрытые пазы встречаются лишь в редких случаях по тем же причинам, что и закрытые круглые пазы. В полузакрытом исполнении пазы с параллельными стенками применяются в роторах асинхронных двигателей средней и большой мощности, имеющих обмотку с так называемым глубоким пазом, но главным образом в фазных роторах. На рис. 1.1 представлены типичные формы таких пазов; закрепление обмотки клиньями применяется в них относительно редко — лишь в более крупных машинах.

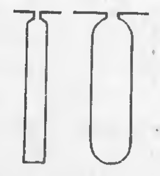


Рис. 1.1. Полузакрытые пазы с параллельными стенками роторов асинхронных двигателей

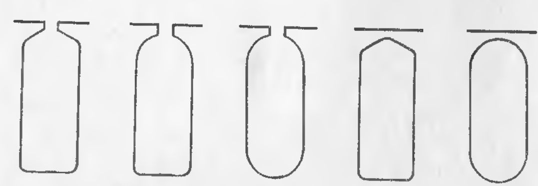


Рис. 1.2. Полузакрытые и закрытые пазы с параллельными стенками статоров машин переменного тока

Следует отметить, что полузакрытые, а иногда и закрытые пазы с параллельными стенками находили обширное применение на первых этапах развития машин переменного тока для обмоток статоров даже наиболее крупных по тем временам синхронных и асинхронных машин; обычные их формы показаны на рис. 1.2. Проводники обмотки имеют при этом, как правило, гораздо бóльшие размеры поперечного сечения, чем ширина отверстия паза; поэтому укладка обмотки возможна только с торцов, для чего выработались два основных приема. Один из них состоит в том, что обмотка выполняется прямо на сердечнике путем поочередного многократного протаскивания проводника через соответствующие пазы, или так называемого *прошивания*, а ее лобовые части формуются на подкладных шаблонах. При втором способе так называемая *разрезная обмотка* состоит из наборов П-образно изогнутых проводников, заготавливаемых отдельно с одной отформованной лобовой частью и вдвигаемых в пазы сбоку, после чего концы, выступившие с противоположной стороны сердечника, перепаиваются между собой в заданном порядке с одновременным формованием второй лобовой части на шаблоне. При обоих способах внутрь паза предварительно вводится гильза, отформованная из изоляционных материалов соответственно профилю паза, и зачастую применяется закрепление обмотки клиньями.

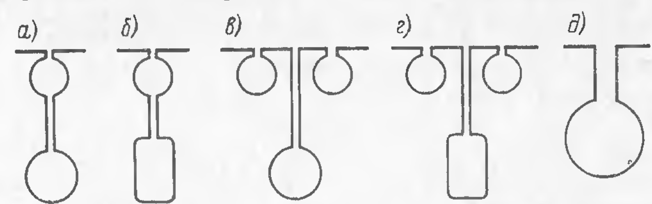


Рис. 1.3. Пазы двухклеточных роторов асинхронных двигателей

В настоящее время способом прошивания иногда выполняются обмотки генераторов повышенной частоты, состоящие из изолированных и прессованных многожильных гибких проводников, или так называемой *литцы*.

В некоторых случаях бывает необходимо искусственно повысить индуктивное сопротивление обмотки, для чего применяются полузакрытые пазы с относительно узкой, но более или менее высокой щелью, обеспечивающей большой поток рассеяния, остающийся в широких пределах пропорциональным току в пазу. Именно так устроены пазы для рабочих обмоток роторов двухклеточных асинхронных двигателей, показанные на рис. 1.3; как правило, в верхней части щели помещается паз для пусковой обмотки, состоящей обычно из стержней круглого сечения, но встречаются и раздельные пазы для каждой из обмоток.

Полузакрытые или закрытые пазы с высокой щелью встречались в прежние годы и в статорных обмотках крупных машин, в частности турбогенераторов, где применялись с той же целью —

за счет увеличения потока рассеяния повысить индуктивное сопротивление обмотки и ограничить токи короткого замыкания; примеры таких пазов даны на рис. 1.4;

В настоящее время пазы с параллельными стенками и полным открытием являются основной формой для обмоток якорей машин средней и большой мощности; выемки в верхней части зубцов служат для удержания пазовых клиньев. Собственно только формой последних они и отличаются друг от друга, если не считать еще отношения глубины к ширине, которое может варьироваться в довольно широких пределах; как правило, оно возрастает с увеличением мощности машин. Дно таких пазов обычно плоское и соединяется с боковыми стенками через закругления, радиус которых выбирается из технологических соображений — чтобы предохранять углы пуансонов штампа от выкрашивания. На рис. 1.5 даны типичные современные формы пазов данного типа.

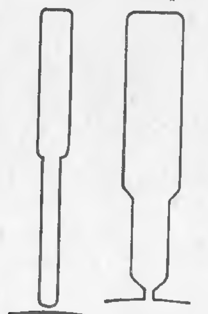


Рис. 1.4. Пазы обмоток статоров с повышенным индуктивным сопротивлением

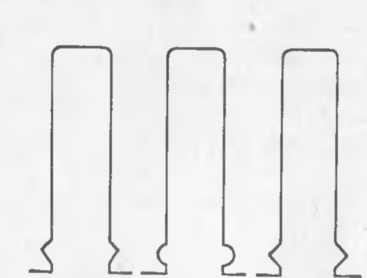


Рис. 1.5. Открытые пазы обмоток якорей

На вращающихся частях машин постоянного и переменного тока открытые пазы с параллельными стенками принимают гораздо более разнообразные формы. Они встречаются прежде всего в роторах глубокопазных асинхронных двигателей, где имеют обычно форму узкой и глубокой щели, в которую со стороны активной поверхности плотно вводится проводник соответствующего профиля. Как правило, они располагаются радиально, но встречается и наклонное их расположение (рис. 1.6).



Рис. 1.6. Наклонные пазы ротора асинхронного двигателя с глубоким пазом

Далее, такие пазы применяются в якорях коллекторных машин, и в этом случае они либо снабжаются выемками для пазовых клиньев, как пазы для статорных обмоток, либо вовсе не имеют их, если закрепление обмотки в пазах производится бандажами. В отдель-

ных случаях открытые пазы находят применение в фазных роторах асинхронных двигателей относительно небольшой мощности, поскольку они позволяют выполнять обмотку ротора секциями из довольно значительного числа проводников малого сечения, полностью отформованными отдельно от машины и закладываемыми со стороны активной поверхности. Такие пазы отличаются от предыдущих только значительно бо́льшим отношением глубины к ширине: в то время как в якорях машин постоянного тока и им подобных оно редко превосходит 5, здесь оно может доходить до 10.

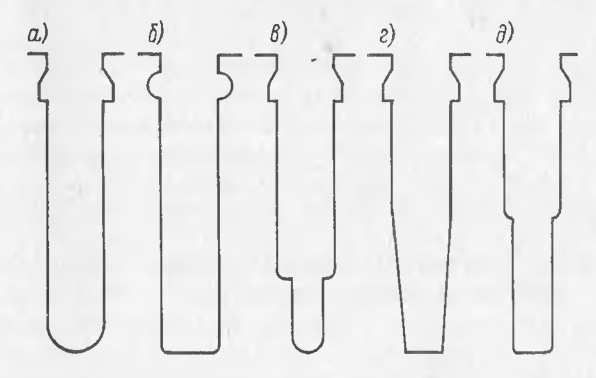


Рис. 1.7. Пазы индукторов неявнополюсных синхронных машин

Довольно разнообразны по форме пазы неявнополюсных индукторов синхронных машин, в основном турбогенераторов; они различаются как формой заплечиков для клиньев, как на рис. 1.7, *а* и *б*, так иногда и наличием подпазовых каналов для охлаждения, как на рис. 1.7, *в*. В наиболее крупных машинах им придается клинообразная форма (рис. 1.7, *г*) или ступенчатая форма (рис. 1.7, *д*); это дает возможность некоторого утолщения корней зубцов, в которых магнитная индукция и механические напряжения достигают очень высоких значений.

Следует упомянуть своеобразное выполнение двухполюсных индукторов с параллельными пазами по рис. 1.8 для небольших турбомашин. Его преимуществом является возможность наложения обмотки на намоточном станке непосредственно в пазы, для чего средняя часть ротора, так называемая *бочка*, выставляется на станок при помощи привинчиваемых к ней цапф, а концевые части с шейками вала и контактными кольцами присоединяются потом к уже вполне готовой обмотанной и заклиненной бочке.

Эта конструкция характеризуется также специфической формой пазовых клиньев, отдельной для каждого положения паза относительно продольной оси полюсов. Пазы находятся не только на цилиндрической поверхности бочки, но и на ее торцах, так что обмотка закрыта клиньями со всех сторон. Недостатком этой конструкции, ограничивающим ее применение машинами небольших мощностей, являются приставные концы вала.

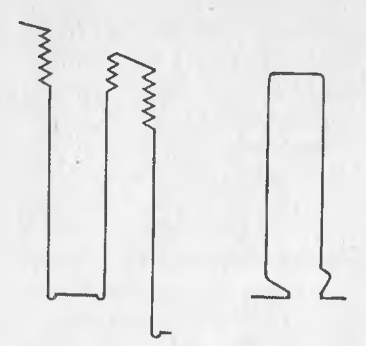


Рис. 1.8. Паз обмотки ротора, наматываемой на станке.

Рис. 1.9. Полуоткрытый паз обмотки статора

Полуоткрытые пазы с параллельными стенками (рис. 1.9) имеют узкую область применения — обмотки статоров машин переменного тока мощностью от нескольких десятков до немногих сотен киловатт. Они позволяют до некоторой степени совместить достоинство открытых пазов — возможность укладки отформованных и полностью изолированных секций обмотки через отверстие паза и достоинство полузакрытых пазов, состоящее в том, что активная поверхность стали сердечника прерывается отверстиями пазов, не столь широкими, как при открытых пазах, хотя и не столь узкими, как при полузакрытых.

Пазы с непараллельными стенками широко применяются для обмоток статоров асинхронных двигателей и синхронных машин, начиная от самых малых и до машин мощностью в десятки киловатт, и в этом случае всегда являются полузакрытыми. Формы их довольно разнообразны — от очертаний, составленных из отрезков прямых, до плавного соединения боковых сторон дугой окружности (рис. 1.10, *а* и *б*).

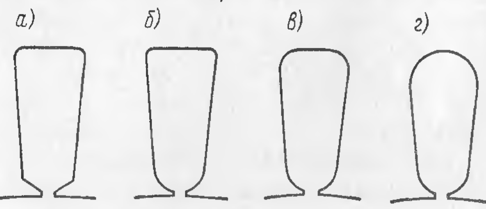


Рис. 1.10. Полузакрытые пазы с непараллельными стенками обмоток машин небольшой мощности

Углы пуансонов штампа склонны к выкрашиванию, поэтому их следует закруглять, как уже упоминалось ранее. Однако для удобного размещения проводников эти закругления полностью отвечают цели только тогда, когда сливаются в общую дугу окружности, как на рис. 1.10, *г*. Промежуточное исполнение (рис. 1.10, *в*) имеет то достоинство, что при нем не возникает местных повышений индукции в теле статора против дна каждого паза, свойственных форме, показанной на рис. 1.10, *г*.

Ширина щели таких пазов должна быть достаточной для поочередного введения через нее отдельных проводников, причем для предохранения их изоляции от обдирания о края щели последние должны быть при этом покрыты тонкими, но механически прочными слоями изоляции, выступающими из паза. Чтобы такая

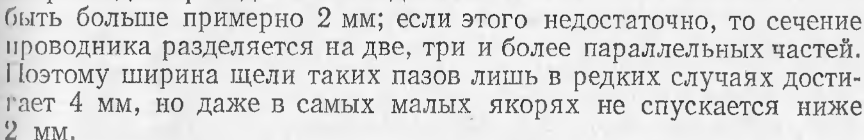


Рис. 1.11. Пазы роторов с алюминиевой короткозамкнутой клеткой

операция, называемая *всыпанием* обмотки, протекала бесперебойно, диаметр меди проводника не должен быть больше примерно 2 мм; если этого недостаточно, то сечение проводника разделяется на две, три и более параллельных частей. Поэтому ширина щели таких пазов лишь в редких случаях достигает 4 мм, но даже в самых малых якорях не спускается ниже 2 мм.

Для роторов асинхронных двигателей пазы с непараллельными стенками применяются главным образом в случае литых алюминиевых обмоток; они бывают как полузакрытыми, так и закрытыми. Последние имеют преимущество с точки зрения технологии заливки алюминием; толщина перемычки, закрывающей паз, обычно выбирается при этом минимально выполнимой при штамповке. Формы этих пазов показаны на рис. 1.11; они применяются как для одноклеточного, так и для двухклеточного исполнения, причем в последнем случае — для нижней, рабочей, клетки, в то время как верхняя, пусковая, клетка имеет стержни большей частью круглой формы.

Кроме того, полузакрытые пазы с непараллельными стенками находят применение для роторных обмоток коллекторных двигателей небольшой мощности, равно как и для якорных обмоток небольших машин постоянного тока.

1.2. ПАЗОВЫЕ КЛИНЬЯ И БАНДАЖИ

Пазовый клин по форме поперечного сечения должен хорошо подходить к месту своей посадки; как правило, последняя производится с определенным усилием, обеспечивающим плотность сидения клина, но не настолько большим, чтобы поверхности клина обдирались краями паза. Эта плотность должна сохраняться во все время эксплуатации машины, для чего нужно, чтобы размеры поперечного сечения клина не изменялись под влиянием тех воздействий, термических и механических, которым он может подвергаться в условиях эксплуатации и которые, конечно, не должны выходить за пределы, допустимые для машин данного вида.

По своим физическим свойствам материал клиньев в зависимости от места их применения может быть неэлектропроводным и немагнитным, электропроводным и немагнитным, электропроводным и магнитным и, наконец, неэлектропроводным и магнитным. Как правило, клинья, закрывающие пазы с обмотками переменного тока, должны быть неэлектропроводны, а клинья, закрывающие пазы с обмотками постоянного тока, — немагнитны; впрочем, могут быть отдельные частичные исключения. Во всех случаях

материал клиньев должен быть механически достаточно прочным и нехрупким.

Простейшими и в то же время наиболее часто применяемыми являются неэлектропроводные и немагнитные клинья. Материалом для них может служить в принципе любой твердый диэлектрик, допускающий изготовление брусков данного профиля; однако поставленные выше условия требуют, чтобы этот материал не был пластичным ни в холодном состоянии, ни при той температуре, которая возможна при нормальной эксплуатации машины. Этому лучше всего удовлетворяют волокнистые материалы, в первую очередь дерево, различные искусственные слоистые материалы, такие, как фибра или производные бакелита — гетинакс, текстолит, и, наконец, пластические массы с волокнистым наполнителем, имеющие достаточно высокую температуру полимеризации.

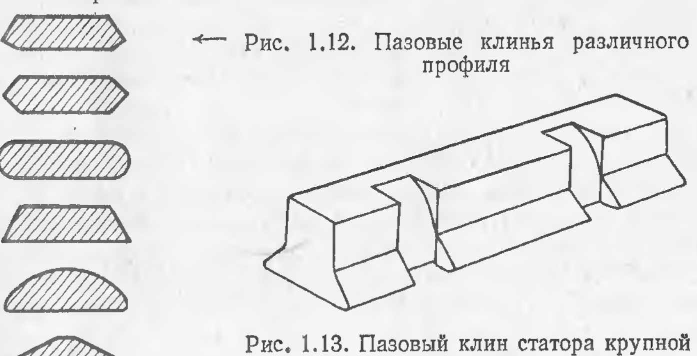
Областью почти исключительного применения деревянных пазовых клиньев являются полузакрытые пазы, а также закрытые пазы в тех случаях, когда клин вводится для уплотнения обмотки из многих проводников, заложенных способами прошивания или разрезных секций. В этом применении клин либо лишь в малой степени, либо вовсе не подвергается усилиям, способным изгибать его поперечное сечение. Профиль последнего подгоняется под очертание верхней части паза и может поэтому иметь вид либо сегмента окружности, либо трапеции с несколько закругленными углами.

Следует отметить, что для пазов наиболее мелких машин трудно изготовлять деревянные клинья и их обычно с успехом заменяют полосками твердого электротехнического картона или фибры. Известны попытки замены твердых клиньев шнуром, вводимым в паз после укладки обмотки, но широкого распространения это не получило.

При открытых пазах возможно появление механических напряжений, изгибающих профиль клина; поскольку прочность древесины на изгиб поперек направления волокна невелика, в настоящее время деревянные клинья применяются либо для относительно неширокиx пазов небольших машин, либо в тех случаях, когда механические напряжения этого рода исключаются. Клиньям придается призматическая форма поперечного сечения, соответствующая очертанию заплечиков паза, примеры чего даны на рис. 1.12.

Когда механические напряжения в клиньях не исключаются, последние предпочтительно изготовлять из искусственных волокнистых материалов; в машинах с изоляцией обмоток, относящейся к современным классам с повышенной нагревостойкостью F и H, материал клиньев должен быть изготовлен из связующих соответствующего класса. В весьма крупных синхронных машинах — турбо- и гидрогенераторах, а отчасти также в компенсаторах и двигателях механические напряжения в клиньях пазов, содержа-

щих проводники разных фаз, при внезапных коротких замыканиях могут быть очень велики; для того чтобы клинья были достаточно прочны, им приходится придавать значительную высоту. При этом большей частью надлежит учитывать, что такой клин перегораживает радиальные вентиляционные каналы сердечника статора и затрудняет циркуляцию охлаждающего газа; поэтому в клиньях приходится устраивать скосы против каждого вентиляционного канала, так что они приобретают вид, представленный на рис. 1.13.



← Рис. 1.12. Пазовые клинья различного профиля

Рис. 1.13. Пазовый клин статора крупной машины

При всех неудобствах полузакрытых пазов по сравнению с открытыми они обладают тем преимуществом, что их отверстия представляют меньшие нарушения однородности активной поверхности сердечника. С целью возможного ослабления такого недостатка открытых пазов зачастую предпринимаются попытки изготовления пазовых клиньев из неэлектропроводных, но магнитных материалов. Впрочем, такие клинья должны обладать неэлектропроводностью, и то лишь относительной, только в осевом направлении машины, чтобы в них не могли индуктироваться сколько-нибудь существенные электродвижущие силы.

Примитивным способом создания таких клиньев следует считать их изготовление из элементов, штампованных из обычной листовой электротехнической стали и тем или иным образом скрепляемых в бруски нужного профиля. В качестве примера достаточно привести изображенную на рис. 1.14 конструкцию, которую еще в начале века применяли некоторые зарубежные фирмы. Заготовки отдельно показанного очертания скреплялись между собой металлическими шпильками; ввести такой клин в

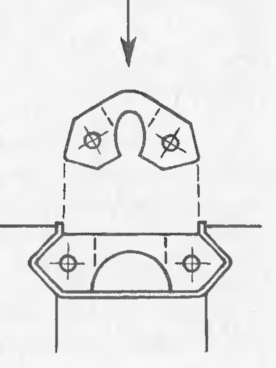


Рис. 1.14. Магнитный пазовый клин из штампованных элементов

паз вдвиганием сбоку не представлялось возможным, поэтому он вкладывался на свое место со стороны активной поверхности в сложенном виде и затем выпрямлялся ударами по месту излома профиля. Практика применения таких клиньев показала, что в результате вибрации под влиянием магнитных полей шпильки изнашивались, выходили из своих гнезд и клинья рассыпались на составные элементы.

Не лучшие результаты дает склеивание штампованных элементов с последующим обкатыванием всего их пакета листовыми изолирующими материалами, что позволяет вдвигать клинья в пазы с торца; под влиянием вибраций элементы разрушают как склейку, так и оболочку из изолирующего материала и также рассыпаются.

Предпринимались попытки изготовления магнитных клиньев из порошкообразного железа на полимеризующемся связующем, что давало бы возможность получения точного профиля в пресс-формах, или сворачиванием из стальной проволочной сетки с последующей опрессовкой со связующим; такие клинья несколько более устойчивы против вибрации, но их магнитопроводность недостаточно велика и они плохо удовлетворяют поставленной цели.

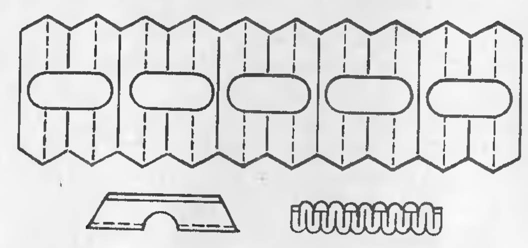


Рис. 1.15. Магнитный пазовый клин, опрессованный пластмассой

Заслуживают упоминания конструкции, предусматривающие изготовление магнитной основы клина из листовой электротехнической стали, штампованной таким образом, чтобы по возможности удлинить пути токов, и затем гофрированной в продольном направлении и опрессованной пластической массой, как показано на рис. 1.15; однако следует признать, что вполне надежной конструкции магнитного клина пока нет.

Электропроводные, т. е. металлические, клинья применяются для пазов с обмотками постоянного тока; по существу, это только обмотки возбуждения неявнополюсных синхронных машин, главным образом быстроходных — турбогенераторов и турбодвигателей, хотя такие обмотки встречаются иногда и в более или менее тихоходных многополюсных машинах в неявнополюсном исполнении.

Весьма высокие центробежные силы, с которыми содержимое паза нажимает в таких машинах на клин, требуют от последнего

значительной механической прочности, которая не может быть обеспечена неметаллическими материалами. Электропроводность металлов не является их достоинством как материала для этих клиньев: в их массе могут индуктироваться паразитные токи и приходится принимать меры к тому, чтобы они не оказывали вредного действия.

Если клин, закрывающий паз обмотки возбуждения, изготовить из магнитного материала, то в нем образуется значительный поток рассеяния, бесполезно насыщающий зубцы, и без того сильно насыщенные; поэтому для таких клиньев применяются немагнитные металлы с высокой механической прочностью. Однако немагнитные стали малопригодны в качестве такого материала, потому что вследствие их большой твердости крайне затруднена подгонка клиньев к местам их посадки.

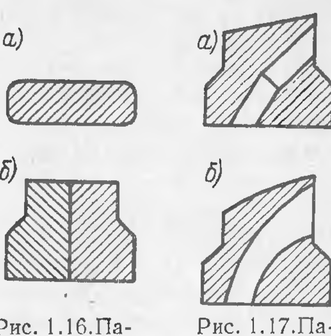


Рис. 1.16. Пазовые клинья индукторов неявнополюсных синхронных машин

Рис. 1.17. Пазовые клинья индукторов с каналами для непосредственного газового охлаждения обмотки

На ранних этапах развития турбогенераторостроения материалом для роторных клиньев были различные бронзы с повышенными механическими характеристиками; но затем их стал успешно вытеснять дюралюминий — сплав высокой прочности, в то же время хорошо поддающийся механической обработке. Помимо всего этот сплав обладает почти в три раза меньшей плотностью, чем бронза (в среднем 2,9 против 8,7), что заметно облегчает его работу.

Первоначально профилю роторных клиньев придавалась прямоугольная форма (рис. 1.16, *а*), но с течением времени она была практически повсеместно вытеснена профилем, показанным на рис. 1.16, *б*. Наклонные грани этого профиля обеспечивают хорошее прилегание клина, а его верхняя прямоугольная часть, заполняющая отверстие паза, доходя до наружной поверхности ротора, предотвращает бесполезные потери от завихрения газообразной среды в зазоре машины.

Следует упомянуть, что в сравнительно недавнее время широко применялись клинья, составленные из двух половин одинаковой формы, одна из которых изготовлялась из бронзы, а другая — из магнитной стали. Такая конструкция, с одной стороны, препятствует образованию значительных потоков рассеяния через верхнюю часть паза, а с другой — до некоторой степени уменьшает нарушение активной поверхности стали немагнитными промежутками.

С течением времени, когда начало внедряться непосредственное охлаждение проводников обмотки ротора газообразной средой, забираемой из зазора машины и возвращаемой туда же, понадобилось снабжать пазовые клинья каналами для ввода и вывода

газа, а затем и придавать самим клиньям форму, способствующую усилению протекания его через обмотку; примером этого может служить клин, представленный на рис. 1.17, *а*, с встречно рассверленными или расфрезерованными каналами. С целью обеспечения подвода и отвода газа в головках зубцов предусматриваются при этом соответствующие скосы.

Дальнейшее усиление протекания газа потребовало облагораживания формы каналов, которое уже не могло быть выполнено механической обработкой клиньев и допускало только их литое исполнение; наиболее подходящим материалом клиньев при этом является титан — металл высокой механической прочности и с отличными литейными качествами. Пример такого клина дан на рис. 1.17, *б*.

В гладких якорях машин постоянного тока, не имеющих пазов и зубцов, единственным средством закрепления обмотки являются бандажи, наложенные поверх обмотанного якоря. Однако такой способ закрепления с давних пор применялся и для зубчатых якорей, для чего на поверхности зубцов в нескольких местах по длине якоря должны быть заготовлены неглубокие и относительно неширокие кольцевые канавки. Такая конструкция встречается и в настоящее время в якорях небольших диаметров и с умеренными значениями окружной скорости и возможна для роторов коллекторных машин или фазных роторов асинхронных двигателей с открытыми пазами. Преимущество ее состоит в том, что при прочих равных условиях бандажи занимают в радиальном направлении меньше места, чем клинья.

В большинстве случаев бандажи изготовляются паяными из немагнитной проволоки; при этом под них должна подстилаться прокладка из изолирующего материала, достаточно прочного, чтобы проволока при натягивании не могла ее прорезать и повредить изоляцию проводников, и удовлетворительно переносящего температуру пайки бандажа. Однако в последнее время проволочные бандажи стали успешно вытесняться бандажами из нетканого стекловолокна на связующих, обладающих хорошей схватываемостью со стеклом. Такие бандажи не требуют изоляционных прокладок и потому занимают еще меньше места в радиальном направлении, а в случае надобности могут быть распространены на всю наружную поверхность как в активной, так и в лобовых частях, представляя таким образом одно целое. Известным недостатком их является только относительно более легкая повреждаемость по сравнению с проволочными бандажами, что требует бережного обращения с ними при разборке и сборке машины.

1.3. ПРОВОДНИКИ

Основным материалом проводников обмоток электрических машин является электролитически чистая медь с технически достижимым малым удельным сопротивлением, обеспечивающим

минимальные основные потери в обмотках при нагрузке их током. Другие металлы и их сплавы применяются лишь в отдельных, специальных случаях, когда от материала обмотки требуются особые механические или электрические свойства. Исключение из этого представляет только алюминий, которым иногда заменяют медь либо по экономическим соображениям, как более дешевым, либо из-за его меньшей плотности.

Основными формами поперечного сечения проводников для обмоток являются круглая и прямоугольная со слегка закругленными гранями для предотвращения прорезания ими изоляции; однако наряду с этим в специальных случаях применяются разнообразные иные формы поперечного сечения, из которых прежде всего следует упомянуть о полых (трубчатых) проводниках с прямоугольными наружными очертаниями.

Проводники круглого и прямоугольного сечений поставляются либо голые, либо с наложенной на них изоляцией того или иного состава; в зависимости от последнего им присваиваются определенные марки. С точки зрения выполнения обмоток имеют значение не столько сами эти марки проводников и присущие им свойства— теплостойкость, устойчивость против химических агентов и т. д., сколько толщина изоляции, отнимающей ту или иную долю сечения паза, и то лишь в той степени, в которой это может влиять на основные электромагнитные свойства обмоток.

Проводники, поставляемые в голом виде, не обязательно покрываются изоляцией. Совершенно не изолированными укладываются в пазы проводники короткозамкнутых обмоток роторов асинхронных машин и в полюсных наконечниках явнополюсных синхронных машин. Во многих случаях изоляция проводников прямоугольного и подобных ему сечений не покрывает проводник со всех сторон, но лишь подклеивается с одной из широких сторон сечения, как это большей частью делается в обмотках возбуждения синхронных машин. Наконец, не исключены случаи, когда проводники отделяются друг от друга только свободно проложенными прокладками.

Изолированные проводники круглого сечения поставляются различного диаметра, начиная от самых малых и примерно до 5 мм, и у некоторых марок и более; но диаметр проводников, применяемых для изготовления обмоток электрических машин, обычно не превосходит 2 мм, так как при бо́льших диаметрах обращение с проводником становится затруднительным. Если поперечное сечение проводника недостаточно, то вместо дальнейшего увеличения диаметра применяется параллельное соединение двух и более проводников или замена проводниками прямоугольного сечения; поскольку это касается обмоток, укладываемых в пазы, такой переход требует применения пазов, допускающих укладку вполне отформованных элементов обмотки со стороны активной поверхности сердечника, т. е. открытых или по крайней мере полуоткрытых пазов.

По действующему в СССР сортаменту изолированные проводники прямоугольного сечения поставляются с узкой стороной сечения 0,9—5,5 мм и с широкой стороной 2,1—14,5 мм, причем поперечные сечения их изменяются при этом в пределах 1,72—78,9 мм². Сортамент построен так, что при неизменном размере одной из сторон дает площади поперечных сечений, последовательно отличающиеся друг от друга примерно на 8 %, кроме некоторых граничных сечений, в которых из-за отсутствия спроса частично имеются более грубые ступени. Начиная с размера 2,1 и до 5,1 мм поставляются проводники квадратного сечения, однако для обмоток электрических машин их стараются не применять, так как при изготовлении элементов обмотки такие проводники склонны закручиваться.

Отношение большей стороны сечения к меньшей при средних значениях последней выдерживается в общем на уровне 5,5—6,5; при меньших ее значениях оно возрастает примерно до 8,5, а при наибольших понижается до 2,65. Во всех тех случаях, когда требуются сечения, бóльшие содержащихся в сортаменте или с более высокими отношениями большей стороны к меньшей, приходится применять голые проводники прямоугольного сечения; однако отношение большей стороны к меньшей не рекомендуется принимать более 20, так как изгибание на высокое ребро, обычно применяемое при таких сечениях, становится затруднительным. Что касается обмоток якорей, то для них используется далеко не весь сортамент проводников прямоугольного сечения, а преимущественно только его часть, ограниченная меньшим размером сечения не более 2,5—3 мм, а бóльшим размером — только в редких случаях свыше 8—10 мм; если сечение проводника в этих пределах недостаточно, то применяется параллельное соединение нескольких проводников, что более подробно рассмотрено в главе третьей.

Неоспоримым преимуществом проводников прямоугольного сечения перед круглыми является то, что при правильной укладке они хорошо заполняют объем паза, остающийся внутри общей изоляции обмотки от корпуса; теоретически не используются только небольшие пазухи между закругленными углами соседних проводников. Между тем при круглой форме сечения проводниками с их изоляцией заполняется в лучшем случае только часть площади, равная отношению площади круга к площади описанного вокруг него шестиугольника, т. е. $\pi\sqrt{3}/6 = 0,907$ всей площади. В действительности и такая доля не может быть полностью использована из-за ограниченности места, занимаемого проводниками, и потому, что они занимают это место более или менее хаотически, а не по правильно примыкающим друг к другу шестиугольникам (как при скручивании многожильных кабелей).

Полые проводники прямоугольного сечения предназначаются для охлаждения жидкостью, протекающей внутри полости; эта полость может быть либо тоже прямоугольной формы, либо круглой или овальной. В статорных обмотках полые проводники обычно чередуются со сплошными и имеют общее с ними значение большей стороны сечения, но разные значения меньшей; напротив, обмотки возбуждения неявнополюсных индукторов составляются из одних лишь полых проводников. При непосредственном охлаждении проводников газообразной средой полые проводники обычно не применяются; в статорных обмотках размеры сечения проводников слишком недостаточны для удовлетворительного прохода газа, а для обмоток возбуждения предпочтительнее проводники фасонного сечения, образующего каналы для газа или увеличивающего поверхность охлаждения проводника. Так, на рис. 1.18 представлены сечения проводника с боковыми выемками

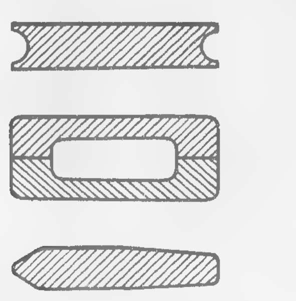


Рис. 1.18. Профили проводников обмотки индукторов, непосредственно охлаждаемых газом

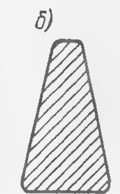


Рис. 1.19. Специальные профили проводников короткозамкнутых клеток

для прохода газа и корытообразное, при котором проводник составляется из двух профилей, обращенных друг к другу полками, между которыми и образуется канал. К этой же категории нужно отнести фасонные профили, применяемые для обмоток возбуждения крупных явнополюсных синхронных машин; клинообразный выступ с одной стороны такого профиля служит для увеличения поверхности теплоотдачи, а утоньшение сечения к противоположной стороне предназначено для компенсации утолщения проводника при изгибании его на высокое ребро.

Для обмоток явновыраженных полюсов крупных машин, особенно гидрогенераторов, иногда применяется проводник прямоугольного поперечного сечения так называемого *периодического* профиля, утолщающийся через определенные интервалы. Охлаждающий воздух проходит через выемки, образующиеся между этими утолщениями, поперек проводников; он подводится к внутренней поверхности полюсной катушки либо через промежуток между ней и сердечником полюса, либо через специальные каналы в последнем.

Проводники обмоток возбуждения синхронных машин с большими окружными скоростями, особенно крупных турбогенерато-

ров, подвергаются значительным сжимающим напряжениям, которые могут превосходить пределы, допустимые для меди, хотя бы и твердотянутой. По этой причине для них применяется медь с небольшой присадкой серебра — примерно 0,1—0,25 %, которая лишь в очень малой степени повышает удельное сопротивление, но весьма значительно — допустимое напряжение на сжатие.

Проводники для неизолированных обмоток имеют зачастую поперечное сечение необычного профиля. Довольно широко применяется проводник так называемого *бутылочного* профиля — сочетания круглого профиля с прямоугольным, как показано на рис. 1.19; прямоугольная часть располагается при этом в щели паза с увеличенной высотой, изображенного на рис. 1.3, *д*. Проводники трапециевидного профиля применяются главным образом для короткозамкнутых обмоток быстроходных двигателей повышенной частоты.

Изолированные проводники из сплавов с повышенным сопротивлением типа константана находят изредка применение для пусковых обмоток небольших асинхронных двигателей однофазного тока.

Сплавы меди с алюминием, цинком, а иногда и с железом и другими элементами, носящие обобщающее наименование бронз, применяются исключительно для неизолированных короткозамкнутых обмоток в тех случаях, когда необходимо повысить их сопротивление.

Особое место среди проводниковых материалов занимают алюминий и его сплавы. Здесь прежде всего следует упомянуть о литых алюминиевых короткозамкнутых обмотках роторов асинхронных двигателей не только малой и средней мощности, но и доходящей в настоящее время до нескольких сотен киловатт; формы поперечного сечения проводников таких обмоток соответствуют формам пазов на рис. 1.11. В этом случае применяется не чистый алюминий, а его сплав с небольшими присадками, улучшающими литейные качества металла, а иногда и отражающимися на его удельном сопротивлении. Такие обмотки отливаются всегда заодно с короткозамыкающими кольцами; при двухклеточном исполнении ротора кольца обычно делаются общими для обеих клеток. Большей частью кольца имеют приливы в виде лопастей, служащие для улучшения охлаждения обмоток, как показано на рис. 1.20; эти приливы не влияют на электромагнитные свойства обмоток.

Чистый алюминий применяется для проводников круглого и прямоугольного сечений, как изолированных, так и голых. Будучи дешевле меди, алюминий имеет ряд присущих ему достоинств и недостатков. Первым его недостатком следует считать то, что его удельное сопротивление почти в 1,5 раза больше, чем у чистой меди; поэтому он не способен серьезно конкурировать с последней, пока речь идет об изоляции тех же марок, что и для меди.

Далее, алюминиевый проводник механически менее прочен, чем медный: он легче вытягивается при намотке элементов об-

мотки на намоточных станках, скорее изламывается на перегибах и может деформироваться при давлении. Наконец, пайка или сварка, очень легкие процессы для меди, крайне затруднены для алюминия, и последний совершенно не пригоден для непосредственного охлаждения проводников водой, так как сильно корродирует.

Однако наряду с этим алюминий обладает, помимо меньшей плотности, еще одним ценным качеством: его нетрудно оксидировать так, что на поверхности проводника образуется пленка оксида, чрезвычайно тонкая, но очень прочная в механическом и электрическом отношении. Это позволяет применять оксидированную алюминиевую проволоку для всыпных обмоток мелких машин без какой-либо другой изоляции проводника; поэтому заполнение паза металлом обмотки получается тем более высоким по сравнению с медным проводником, чем меньше диаметр проволоки, т. е. чем бо́льшая доля сечения паза отнималась бы изоляцией проводников. Таким образом, оксидированный алюминиевый проводник может иметь тот же диаметр, что и медный проводник с изоляцией.

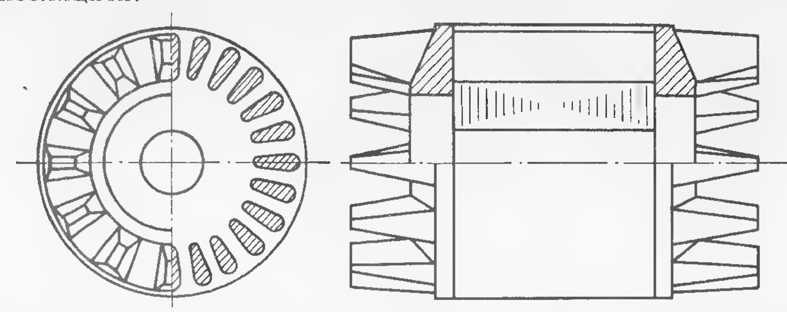


Рис. 1.20. Ротор асинхронного двигателя с литой алюминиевой клеткой

Если обозначить диаметр медного проводника без изоляции через d и с изоляцией через d', то алюминиевый проводник будет иметь сопротивление, не большее, чем медный, при диаметрах медного проводника

$$d \leqslant \frac{d'}{\sqrt{1,6}} = 0,79d'.$$

Чем толще изоляция медного проводника, тем выше этот предел; однако и для проводников большего диаметра замена меди алюминием может давать хорошие результаты при соответствующем расчете машины.

Попытки применения алюминиевого проводника для обмоток возбуждения синхронных машин определяются его меньшей плотностью; однако именно там, где это обстоятельство могло бы играть наиболее существенную роль — в неявнополюсных индукторах с предельно высокими механическими напряжениями

в корнях зубцов — замена меди алюминием не смогла дать преимуществ, потому что нет возможности предоставить алюминиевой обмотке больше места в пазах, чем медной. В результате общая магнитодвижущая сила индуктора с алюминиевой обмоткой при прочих равных условиях должна быть понижена почти на одну треть, что идет вразрез с общим направлением развития турбогенераторостроения; этим и объясняется, что отдельные попытки ряда зарубежных фирм применить алюминий в целом успеха не имели. В СССР не было выпущено ни одного турбогенератора с алюминиевой обмоткой индуктора.

Заслуживает упоминания одно своеобразное применение алюминия для обмотки неявнополюсного индуктора с параллельными пазами по рис. 1.8; обмотка выполнена голым алюминиевым проводником прямоугольного сечения, а роль междувитковой изоляции возлагается на тонкую, специально оксидированную алюминиевую ленту, наматываемую одновременно с обмоткой. Это обеспечивает хорошую теплопередачу от нижних слоев обмотки к наружной поверхности ротора, охлаждаемого вентиляционным воздухом в зазоре машины; однако из-за конструктивных особенностей таких роторов подобное исполнение пригодно только для машин ограниченной мощности.

Сравнительно меньше принципиальных возражений вызывает применение алюминия для обмоток возбуждения явнополюсных синхронных машин; здесь вопрос упирается главным образом в возможность размещения алюминиевой обмотки в междуполюсных промежутках.

1.4. ИЗОЛЯЦИЯ ОБМОТОК

Основным назначением всякой электрической изоляции является предотвращение возможности соединения изолируемой токонесущей части с корпусом или с другими токонесущими частями; в обмотках токонесущими частями являются проводники, а корпус большей частью представляют сердечники из магнитных материалов, хотя в отдельных случаях под понятие «корпус» подходят и иные металлические части, не изолированные от прочих.

Изоляция, предотвращающая соединение активных сторон элементов обмотки с корпусом, обычно носит общее название *корпусной;* как правило, она должна выдерживать полное номинальное напряжение данной обмотки с запасом, определяемым стандартами на электрические машины. В отличие от нее изоляция отдельных проводников, входящих в состав элемента обмотки, предназначена выдерживать лишь ту долю номинального напряжения обмотки, которая может возникать между этими проводниками; ее обычно называют *междувитковой*.

Наконец, если поперечное сечение элемента обмотки настолько велико, что его приходится подразделять на несколько частей, то каждый из составляющих его проводников, называемых в этом

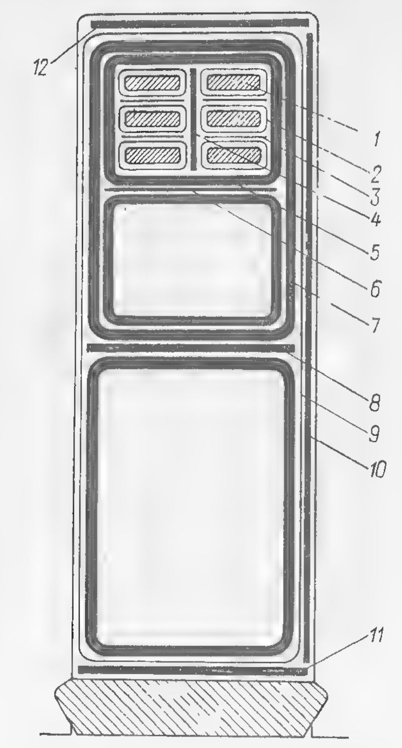


Рис. 1.21. Виды изоляции внутри паза:

1 — металл проводника; *2* — изоляция проводника; *3* — прокладка между проводниками; *4* — прокладка между рядами проводников; *5* — изоляция витка; *6* — прокладка между витками; *7* — корпусная изоляция; *8* — прокладка между слоями; *9* — защитная оболочка; *10* — боковая распорка из упругого волнистого материала; *11* — прокладка под клин; *12* — прокладка на дно паза

случае *элементарными*, отделяется от прочих своей изоляцией.

Помимо этого внутри паза могут быть детали из изолирующих материалов, имеющие несколько иное назначение. Так, корпусная изоляция может иметь дополнительную оболочку, предохраняющую от повреждений при укладке в паз; на дно паза может быть уложена прокладка для предохранения от прорезания корпусной изоляции краями вентиляционных каналов сердечника; если в пазу находятся стороны двух или более секций, одна поверх другой, то между ними вводятся промежуточные прокладки; поверх всего содержимого паза предусматривается прокладка под клин, заполняющая весь избыток по глубине паза, а также предохраняющая корпусную изоляцию от повреждения при забивании клиньев в пазы; наконец, в крупных машинах с корпусной изоляцией обмотки из материалов, не деформирующихся при ее нагревании в процессе эксплуатации, в пазы вводятся дополнительные прокладки из твердого волнистого пружинящего изоляционного материала, препятствующие вибрации обмотки в пазах.

Эти виды изоляции представлены в поперечном сечении паза, изображенном на рис. 1.21; конечно, в реальных обмотках далеко не все они существуют одновременно. Так, обмотки статоров крупных машин с высокими номинальными напряжениями и большими номинальными токами обычно имеют одновитковые секции, вследствие чего отпадает необходимость в междувитковой изоляции; наряду с двухслойными обмотками в таких машинах иногда применяются и однослойные, так что не нужны прокладки между слоями; обмотки высокого напряжения с точно отформованными активными частями секций не нуждаются в дополнительной оболочке для защиты от механических повреждений при укладке в пазы и т. д. В некоторых случаях детали изоляции одного и того же вида могут выполнять несколько различное назначение; например, слой изоляции, непосредственно наложенный на ме-

талл проводника, а также горизонтальные и вертикальные прокладки между отдельными проводниками и их вертикальными рядами служат междувитковой изоляцией, но могут служить и изоляцией между параллельно соединенными элементарными проводниками составного стержня и т. д.

В задачу данной книги не входит рассмотрение различных вариантов конструкции изоляции, которые могут быть чрезвычайно разнообразны; поэтому достаточно ограничиться приведенным выше перечислением видов изоляции по назначению. Только в конце данного параграфа уделено внимание некоторым формам конструкции изоляции, характерным для небольших машин; что же касается машин более или менее крупных, особенно высокого напряжения, то в настоящее время конструкция изоляции их обмоток достаточно установилась и здесь уместно рассматривать ее и применяемые для нее материалы и способы их наложения лишь в той степени, в которой они способны повлиять на устройство обмотки, а через него — и на выбор того или иного ее типа.

Во всех отношениях выгодно, чтобы корпусная изоляция была как можно тоньше. С одной стороны, это дает возможность либо увеличить количество металла проводников обмотки, либо уменьшить размеры паза и тем самым понизить магнитные нагрузки сердечника; с другой же — теплопроводность изоляции тем лучше, чем она тоньше, следовательно, более тонкая изоляция позволяет либо понизить превышение температуры обмотки, либо повысить ее нагрузку. По этой причине повсеместно проводятся изыскания изоляционных материалов, допускающих утоньшение корпусной изоляции. Конечно, теплопроводность различных изоляционных материалов зависит от их состава; так, в целом материалы неорганического происхождения более теплопроводны, чем органические, но большую роль играет еще и однородность структуры материала: хорошая теплопроводность его самого по себе значительно ухудшается за счет промежутков между его слоями, в лучшем случае заполненных менее теплопроводным связующим, а в худшем — воздухом, имеющим значительно более низкую теплопроводность.

При всем том изоляция прежде всего должна выполнять свое основное назначение — быть электрически достаточно прочной. В этом отношении увеличение ее толщины не достигает цели, потому что ему соответствует непропорционально малое понижение градиента потенциала на внутренней поверхности изоляции, т. е. на поверхности проводников, которым, собственно, и определяется электрическая прочность.

Но наряду с этим существуют соображения и механической прочности, которые заставляют придавать корпусной изоляции бо́льшую толщину, чем было бы необходимо и достаточно для ее электрической прочности. Вследствие этого толщину корпусной изоляции приходится выбирать на основании статистических данных о ее надежности.

Вне зависимости от физической природы изоляционных материалов, применяемых для корпусной изоляции, в своем исходном состоянии они могут иметь вид либо листов той или иной толщины, либо бесформенной массы. Наибольшее распространение имеют первые из них; в свою очередь, они могут поступать на изготовление корпусной изоляции либо в виде листов, либо в виде полос той или иной ширины.

Корпусная изоляция из листовых материалов может быть изготовлена либо отдельно от обмотки и помещена в пазы, в которые после этого так или иначе вводится сама обмотка, либо совместно с элементами обмотки, и тогда она составляет с ними нераздельное целое; не исключается и такой случай, когда часть корпусной изоляции, ближайшая к сердечнику, изготовляется первым способом, а часть, ближайшая к самой обмотке, — вторым.

Первым способом, очевидно, должна изготовляться изоляция закрытых и полузакрытых пазов; что касается открытых или полуоткрытых пазов, то для них пригоден любой способ, но второй в общем предпочтительнее, потому что позволяет выполнить изоляцию качественнее — более плотной, с точными наружными размерами. Как правило, сочетание обоих способов преследует главным образом цель предохранить наружную поверхность изоляции, выполненной вторым способом, от повреждений в процессе укладки. При нем естественным образом неизбежны воздушные прослойки, которые в лучшем случае могут быть заполнены при последующей пропитке всей обмотанной части машины.

Наложение корпусной изоляции из листовых материалов требует, чтобы изолируемый элемент обмотки был вполне отформован; изоляция может быть наложена только на его прямолинейные участки, т. е. в основном на активные стороны, а прочие участки должны быть изолированы иначе или вовсе оставлены неизолированными. Поскольку такая изоляция должна быть во всех направлениях равнопрочной, число ее слоев на одной из сторон общего поперечного сечения элемента обмотки должно быть на единицу больше, чем на прочих; обычно такой дополнительный слой располагается на одной из более узких сторон этого сечения, как правило, поперек паза. Таким образом он непроизводительно отнимает некоторую часть сечения паза по высоте, хотя бы и незначительную. Такое наложение изоляции, представленное на рис. 1.22, словесно формулируется как «*столько-то слоев с четвертью*».

В отличие от листов наложение корпусной изоляции полосовыми материалами может производиться по всему периметру элемента обмотки, какую бы форму он ни имел. Конечно, на углах и перегибах эта операция затрудняется, ведет к утолщению общего слоя и ухудшению плотности наложения, но она может производиться сразу для всего элемента, и потому наложенная таким образом изоляция носит название *непрерывной*. Таким же способом могут быть изолированы непрямолинейные участки элементов

с листовой изоляцией активных сторон, если в этом есть надобность; в этом случае переход от одного вида изоляции к другому должен быть постепенным, для чего применяется так называемый *конус*. Если сначала наложена изоляция на прямолинейную часть элемента обмотки, выполненная из постепенно сужающегося листа, как показано на рис. 1.23, то конус называется *прямым*; если же, наоборот, сначала изолирована криволинейная часть элемента полосовыми материалами с постепенным сходом на нет, то конус называется *обратным*. Преимущественное применение при составной изоляции имеет обратный конус.

Рис. 1.22. Наложение изоляции из листовых материалов: *а* — в $1^1/_4$ слоя; *б* — в $2^1/_4$ слоя

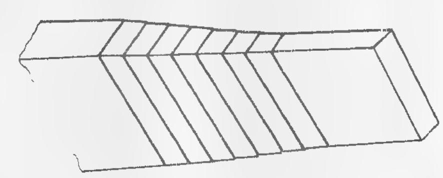


Рис. 1.23. Конус изоляции из листовых материалов

Длина конуса в первую очередь определяется номинальным напряжением обмотки — она должна быть достаточно большой, чтобы не могло происходить перекрытия с обмотки на корпус по поверхности соприкосновения изоляции разных видов; в этом отношении обратный конус более безопасен, так как отводит эту поверхность дальше от корпуса. В любом случае конус не должен заходить внутрь паза; это значит, что он удлиняет прямолинейную часть элемента, которая при непрерывной изоляции может быть более короткой.

Полосовые материалы всегда накладываются в несколько слоев или, как их обычно называют, *рядов*; большей частью число рядов на неактивных сторонах берется немного меньшим, чем на активных сторонах. При этом различаются следующие способы наложения каждого ряда:

а) *вразбежку*, когда между соседними витками ленты остаются некоторые промежутки (рис. 1.24, *а*);

б) *встык*, когда края витков ленты плотно соприкасаются друг с другом (рис. 1.24, *б*);

в) *внахлест*, когда каждый следующий виток ленты частично перекрывает предыдущий; в зависимости от степени перекрытия различаются наложения в одну треть нахлеста, вполнахлеста, как на рис. 1.24, *в*, и т. д.

При первом и втором способах каждый ряд является, по существу, лишь дистанционной прокладкой; во сколько таких рядов ни была бы наложена изоляция, в ней могут существовать слабые

места, в которых электрическая прочность резко не соответствует общему числу рядов; поэтому наложение изоляции производится преимущественно вполнахлеста, что дает наиболее плотный слой. Понятно, что на углах, перегибах и тому подобных местах ряды с внутренней стороны должны получаться с более высокой степенью перекрытия, чтобы на наружной выдерживалось наложение вполнахлеста.

Для придания элементам обмотки точной формы, хотя бы на прямолинейных активных сторонах, их подвергают опрессовке. В своем первоначальном виде опрессовка производилась в металлических формах, что позволяло придать поперечному сечению

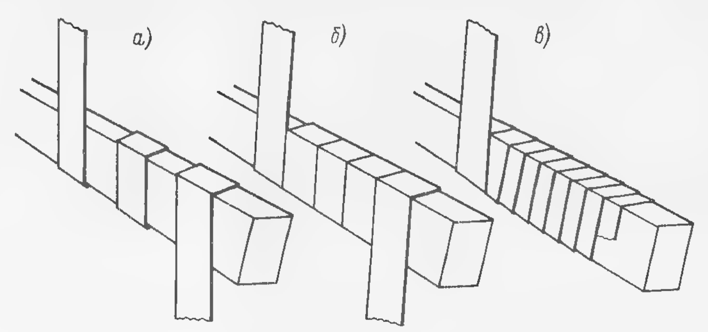


Рис. 1.24. Наложение изоляции из полосовых материалов: *а* — вразбежку; *б* — встык; *в* — внахлест

элемента обмотки достаточно точные размеры; но такая операция не обеспечивает полной плотности слоя изоляции, так как в ее толще могут оставаться неплотности там, где случайно суммарная толщина изоляции оказалась меньшей. В результате достигнутая точность размеров может легко нарушиться.

Более совершенной является гидравлическая опрессовка, при которой давление на изоляцию передается равномерно со всех сторон жидкостью, например расплавленным битумом. Для того чтобы в толще изоляции не могли оставаться пустоты, заполненные воздухом, перед гидравлической опрессовкой элементы обмотки предварительно обрабатываются в вакууме. Битум или жидкость более сложного состава способны проникать между рядами изоляции и частично заполнять возможные пустоты или, как говорят, «компаундировать» обмотку. По этой причине и сама обмотка получает при этом название *компаундированной*. Преимущество компаундированной изоляции перед опрессованной в металлических формах состоит в том, что последние более или менее легко могут быть изготовлены только для прямолинейных участков элемента обмотки, а криволинейные остаются неопрессованными или же для их опрессовки нужно изготовлять крайне сложные формы; между тем гидравлическая опресовка действует на все участки элемента одинаково, не требуя изготовления дорогостоящего оборудования для каждого из таких элементов отдельно.

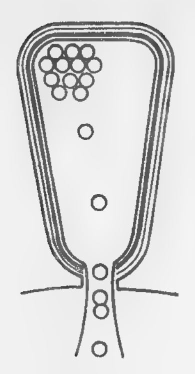


Рис. 1.25. Изоляция паза для всыпной проволочной обмотки

Характерно устройство изоляции всыпных проволочных обмоток (рис. 1.25): корпусная изоляция в них состоит большей частью из трех слоев листовых материалов разного рода, из которых самый внешний, механически весьма прочный, служит только для защиты от механических повреждений следующего слоя из материала с хорошей изолирующей способностью, собственно и являющегося корпусной изоляцией, но зачастую механически недостаточно прочного. Самый внутренний слой, обычно тонкий, но с гладкой лощеной поверхностью, служит для предохранения изоляции проводников от повреждения в отверстии паза при всыпании: его края выступают из паза, а перед заклиновкой их излишки срезаются и остатки загибаются поверх обмотки. Если всыпная обмотка выполняется в два слоя, то в пазы между слоями укладывается прокладка из более или менее твердого полосового материала. Однако ее положение в пазу не является строго определенным, поскольку проводники не размещены в правильном порядке; поэтому не исключена возможность ее смещения, при котором придут в соприкосновение проводники разных слоев, могущие принадлежать разным фазам.

Выкладка полуоткрытых пазов является самым наружным слоем корпусной изоляции; при открытых пазах она применяется главным образом в случае изготовления корпусной изоляции из лакированной ткани, не подвергаемой опрессовке. Так как лакированные ткани легко повреждаются, то поверх них накладывается защитное покрытие из текстильной ленты, которая даже в пропитанном виде может зацепляться за края отверстия паза.

Совершенно без изоляции выполняются короткозамкнутые клетки роторов асинхронных двигателей и полюсных наконечников синхронных машин, так что стержни таких клеток могут иметь контакты со сталью сердечников, способные создавать обходные пути для токов. Это явление в общем следует считать нежелательным, так как оно способно сопровождаться добавочными потерями; иногда приходится встречаться с изолированными короткозамкнутыми обмотками, но трудности изготовления препятствуют их внедрению в широкую практику электромашиностроения. Однако самым главным препятствием является то, что изолированные стержни очень трудно предохранить от вибрации, поскольку посадка их в пазы не может быть достаточно плотной; даже неизолированные стержни, забиваемые из-под молотка, способны вибрировать и претерпевать усталостные разрушения.

Основным природным материалом для изготовления изоляции обмоток, особенно высокого напряжения, является слюда; она

начала находить применение с первых же этапов изготовления машин более или менее высокого напряжения благодаря отличным изолирующим свойствам, относительно высокой теплопроводности и большой теплостойкости. Однако для применения в обмотках слюда в чистом виде непригодна; чтобы ее можно было накладывать на проводники и другие токоведущие части, ее тонко нащипанные пластинки приходится наклеивать на *подложку* из бумаги или ткани, теплостойкость которых значительно ниже, при помощи клеющего вещества, или *связующего*, и если часть, изолированная таким материалом, при работе будет продолжительно перегреваться сверх некоторого относительно низкого уровня, при котором уже начинается разложение (по существу — замедленное горение) подложек и связующих, то изоляция разрушается, хотя ее основа — слюда — остается практически не поврежденной, поскольку она сама по себе способна выдерживать значительно более высокую температуру.

Изолирующие материалы, полученные наклеиванием пластинок слюды на разного рода подложки и имеющие вид более или менее тонких гибких листов, носят название *микафолия*, а будучи нарезаны на полосы шириной 10—20 мм, — *микаленты*. В качестве связующих в них применяются различные смолы, как натуральные, так и синтетические, в первую очередь шеллак. Изоляция из таких материалов при всех своих недостатках имеет одно ценное преимущество — при нагревании она становится достаточно пластичной, что позволяет в известной степени деформировать изолированные ею секции обмотки при их укладке в пазы без особого риска их повреждения.

Однако природные запасы слюды, пригодной для изготовления таких материалов, очень ограничены и в значительной степени истощены; наклеивание щипаных пластинок на подложку плохо поддается механизации и в основном является трудоемкой ручной операцией, при которой неизбежна неоднородность наклеиваемого слоя; при нагревании даже в пределах теплостойкости изоляция склонна к распуханию, в результате которого затрудняется извлечение обмотки из пазов при ремонтных работах.

Все это привело к необходимости, во-первых, использовать более мелкие фракции слюды — в виде тонких чешуек, получаемых механическим измельчением блоков, непригодных для приготовления щипаной слюды достаточных размеров, во-вторых, применять подложки из неорганического волокна, в основном стекла, реже — асбеста, и, в-третьих, использовать в качестве связующих синтетические смолы, способные затвердевать после нагревания до определенной температуры и называемые *термореактивными*.

Достоинством таких материалов в первую очередь является более высокая теплостойкость; следует, однако, сразу отметить, что в наиболее крупных машинах это свойство не может быть в должной степени использовано, поскольку допускаемые пре-

вышения температуры обмоток в таких машинах ограничиваются в большей степени температурными деформациями обмоток, нежели теплостойкостью, а при применении непосредственного водяного охлаждения обмоток — недопустимостью кипения охлаждающей воды.

Вторым крупным достоинством термореактивной изоляции является возможность получения большей ее однородности за счет исключения воздушных прослоек. В результате этого толщина изоляции может быть понижена по сравнению с микалентной, в связи с чем прежде всего повышается использование площади сечения паза, а затем значительно возрастает теплопроводность изоляции, способствующая лучшему охлаждению обмоток внешними охлаждающими средами. Правда, при внутрипроводниковом охлаждении обмоток, характерном для современных крупных машин, и этот фактор не имеет существенного значения.

Наряду с этим термореактивная изоляция имеет и отрицательные качества, из которых прежде всего следует отметить ее хрупкость, не допускающую сколько-нибудь существенного деформирования секций при укладке в пазы; это сильно затрудняет наложение равносекционных обмоток из цельных секций, при котором первые укладываемые секции на протяжении шага обмотки должны оставаться не уложенными одной стороной в пазы для возможности подвести под них стороны последних укладываемых секций.

К недостаткам этой изоляции следует отнести также токсичность некоторых применяемых связующих, заставляющую либо применять особые защитные меры, либо отказываться от таких связующих, несмотря на другие их положительные качества.

1.5. РАСПОЛОЖЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ ОБМОТОК В ПАЗАХ

Проводники прямоугольного сечения требуют правильной укладки в пазах, недостижимой во всыпных проволочных обмотках из проводника круглого сечения. В пазах якорей машин постоянного тока сколько-нибудь значительной мощности проводники прямоугольного сечения, как правило, располагаются стоймя — большей стороной сечения по глубине паза. Это объясняется тем, что, за исключением якорей очень низкого напряжения, в одном и том же пазу помещаются рядом стороны нескольких секций, преимущественно одновитковых, каждая из которых должна быть впаяна обоими концами в петушки пластин коллектора, что крайне неудобно при расположении проводников плашмя, т. е. большей стороной сечения по ширине паза, следовательно, друг над другом. Ради удобства конструкции приходится мириться с тем, что в проводниках возникают вихревые токи и выделяются добавочные потери, пропорциональные *четвертой степени* размера поперечного сечения проводника по глубине паза и только первой степени его размера по ширине. Правда, большей частью

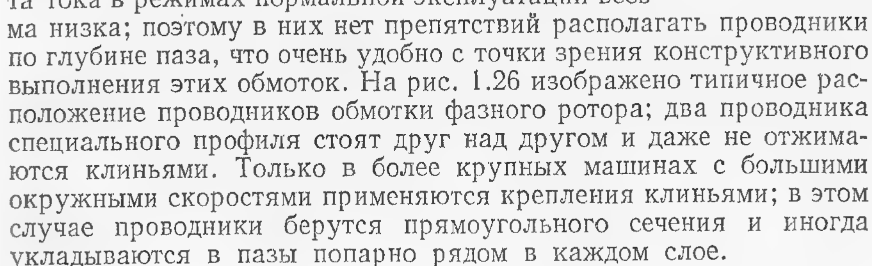


Рис. 1.26. Расположение проводников обмотки фазного ротора

в якорях крупных машин постоянного тока относительно невысока частота тока, *квадрату* которой пропорциональны эти добавочные потери.

В якорях машин переменного тока, не соединенных с коллекторами, нет основания располагать проводники в пазу стоймя, и потому их предпочитают класть плашмя с целью снижения добавочных потерь. Исключение из этого представляют лишь обмотки фазных роторов асинхронных машин — вторичных якорей, в которых частота тока в режимах нормальной эксплуатации весьма низка; поэтому в них нет препятствий располагать проводники по глубине паза, что очень удобно с точки зрения конструктивного выполнения этих обмоток. На рис. 1.26 изображено типичное расположение проводников обмотки фазного ротора; два проводника специального профиля стоят друг над другом и даже не отжимаются клиньями. Только в более крупных машинах с большими окружными скоростями применяются крепления клиньями; в этом случае проводники берутся прямоугольного сечения и иногда укладываются в пазы попарно рядом в каждом слое.

В относительно небольших асинхронных двигателях встречаются обмотки фазных роторов с многовитковыми секциями из проводника прямоугольного сечения, уложенного в пазы плашмя; но это исполнение нельзя считать характерным.

В обмотках статоров отдельные проводники всегда располагаются плашмя: в небольших пазах по ширине паза помещается только один проводник, в более широких — два и лишь изредка больше. При этом очень существенно, в каком порядке чередуются проводники внутри секции; если в пазу помещается два или более вертикальных рядов проводников, то необходимо принимать меры к тому, чтобы разность напряжений соседних проводников была по возможности меньшей.

При изготовлении многовитковых элементов обмоток из проводника прямоугольного сечения возможны два способа намотки: с изгибом проводника на высокое ребро (рис. 1.27, *а*) и на низкое ребро (рис. 1.27, *б*). Пока намотка элементов производится в один ряд, оба способа в отношении напряжения между соседними витками одинаковы — оно равно напряжению одного витка; однако если число рядов по высоте становится больше одного, то возникает различие между обоими способами.

При первом способе — изгибании на высокое ребро — после намотки одного ряда, например от дна паза к его отверстию, естественно перейти к намотке второго ряда в противоположном направлении — от отверстия паза к его дну; это может быть сделано без перекрещивания проводников в лобовой части со стороны

начала намотки, но приводит к тому, что между первым витком первого ряда и последним витком второго ряда, которые окажутся лежащими в пазу рядом, будет существовать наибольшая разность напряжений (рис. 1.28, *а*). Можно было бы дальше поступать так: отрезав проводник после окончания намотки первого ряда, намотать потом второй в том же порядке, как и первый,

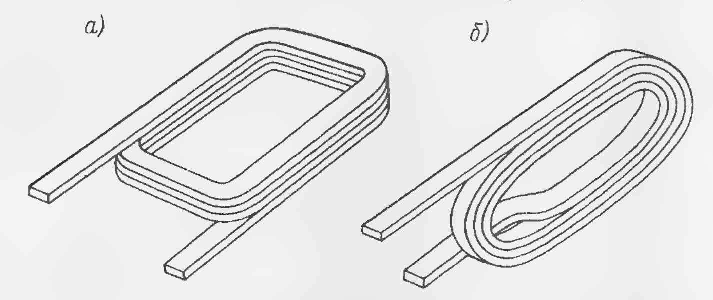


Рис. 1.27. Способы намотки элементов обмотки: *а* — с изгибом на высокое ребро; *б* — с изгибом на низкое ребро

после чего соединить между собой начало второго ряда с концом первого; это привело бы к тому, что наибольшая разность напряжений между соседними витками станет вдвое меньше, но зато будет одной и той же между любыми двумя соседними витками по высоте (рис. 1.28, *б*).

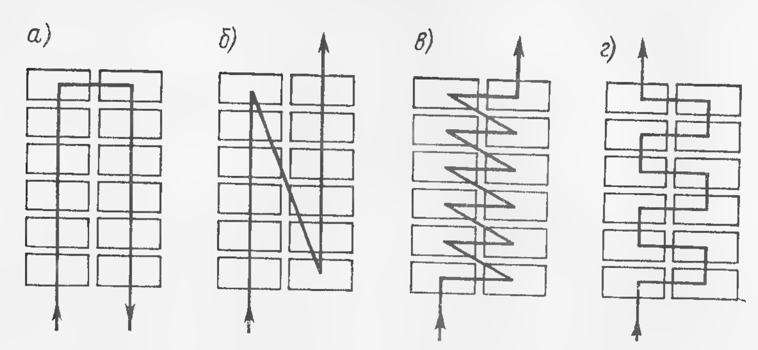


Рис. 1.28. Различное чередование проводников в пазу

При втором способе намотки — изгибании на низкое ребро — затруднение представляет то обстоятельство, что начало намотки элемента спрятано под всеми намотанными витками и его нужно выводить вбок, что осложняет форму элемента. Иногда, например при изготовлении катушек добавочных полюсов машин постоянного тока, применяется раздельная намотка рядов в противоположных направлениях, для чего начала обоих рядов предварительно соединяются перемычкой, а оба конца оказываются снаружи, но это выполнимо только при малых числах витков в рядах.

Для снижения разности напряжений между соседними проводниками при намотке в два ряда можно применить два способа их чередования в пазу: *зигзагом* (рис. 1.28, *в*) и *ступенчатый* (рис. 1.28, *г*); оба способа обеспечивают минимальную возможную разность напряжений, но первый из них может быть применен при обоих способах намотки, а второй — только при намотке на низкое ребро, так как при намотке на высокое ребро не на что начать наматывать наружный ряд, пока внутреннего еще нет. В обоих случаях между соседними по высоте проводниками будет существовать разность напряжений, равная утроенному напряжению одного витка: при способе зигзагом — между всеми проводниками, а при ступенчатом — через один проводник.

При обоих этих способах неизбежны перекрещивания проводников в лобовых частях элементов при переходе из одного ряда в другой; чтобы эти перекрещивания не служили источниками междувитковых замыканий, их нужно дополнительно изолировать, что затрудняет изготовление элемента. По этой причине естественно стремление выполнять элементы по возможности с укладкой проводников в один ряд.

При подразделении сечения проводника на части последние было бы предпочтительно располагать в пазу рядом по ширине; но обычно ширина паза для этого недостаточна, так что приходится укладывать их друг под другом. Вследствие этого отдельные элементарные проводники оказываются связанными с различными долями потока рассеяния, замыкающегося поперек паза, и потому их индуктивные сопротивления становятся неодинаковыми: чем ближе к дну паза лежит элементарный проводник, тем больше его индуктивное сопротивление. В результате распределение тока между элементарными проводниками становится неравномерным — ток вытесняется к отверстию паза, а это ведет к увеличению потерь в обмотке.

Пока число частей, на которые подразделено сечение проводника, еще невелико, неравномерность распределения тока между ними остается умеренной и может быть допущена; но в элементах обмотки с малыми числами витков, особенно в одновитковых, число элементарных проводников может достигать многих десятков, и тогда для выравнивания их индуктивных сопротивлений приходится принимать меры, рассматриваемые ниже, в главе третьей.

При намотке элементов обмотки в направлении глубины паза части подразделенного сечения в противоположных активных сторонах элемента оказываются лежащими в обратном друг другу порядке: если, например, в левой стороне элемента одна часть лежала над другой, то в правой стороне они обменяются местами. Это в известной степени уменьшает неравномерность распределения тока между частями, хотя и не устраняет ее полностью. При намотке элементов в направлении поперек паза части сечения сохраняют свое относительное расположение в обеих активных сторо-

нах элемента, если не приняты специальные меры против этого в виде перекрещиваний элементарных проводников в лобовой части; как всякие перекрещивания, они нежелательны.

При непосредственном жидкостном охлаждении обмоток высота поперечного сечения полого проводника при одинаковой его площади, естественно, получается большей, чем сплошного проводника той же ширины, и это ведет к заметному возрастанию добавочных потерь в таких проводниках. Если сечение проводника не подразделено на части, то все проводники в пазу являются полыми; однако многовитковые элементы обмоток весьма редко выполняются с непосредственным жидкостным охлаждением,

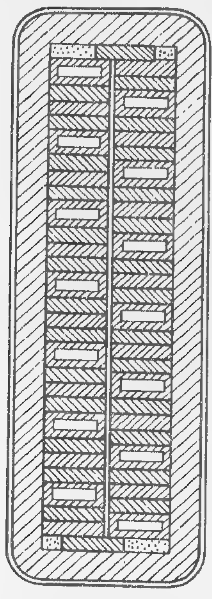


Рис. 1.29. Поперечное сечение элемента обмотки с жидкостным охлаждением

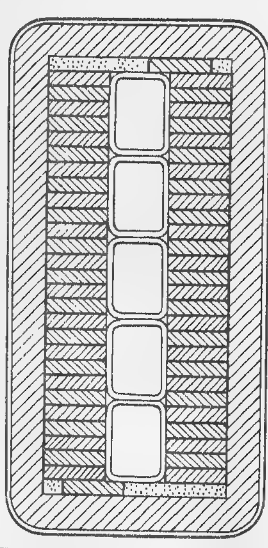


Рис. 1.30. Поперечное сечение элемента обмотки с газовым охлаждением

кроме обмоток индукторов, в которых вопрос о добавочных потерях не возникает. Но при сечении проводника, подразделенном на части, нет надобности делать их все полыми — достаточно, если охлаждающая жидкость будет протекать только через некоторую долю частей сечения; чем плотнее опрессованы элементы обмотки и, следовательно, чем лучше теплопередача между элементарными проводниками, тем меньшая доля частей сечения может быть полой. В современных конструкциях обычно она не превосходит 1/4—1/5 (рис. 1.29).

При непосредственном газовом охлаждении обмоток статоров крупных машин каналы внутри проводников недостаточны для

прохода газа; поэтому в пазах приходится устраивать специальные каналы в виде тонкостенных труб из материала с высоким удельным сопротивлением, преимущественно из немагнитной нержавеющей стали, вставляемых между вертикальными рядами элементарных проводников, как показано на рис. 1.30.

Применение непосредственного водяного охлаждения проводников обмотки якоря позволяет повысить плотность тока в этой обмотке в 2,5—3 раза; это дает возможность довести единичную мощность наиболее крупных электрических машин при умеренной затрате материалов до весьма высоких пределов, которые были бы недостижимы без применения интенсивного охлаждения, но ведет к возрастанию потерь в обмотке соответственно в 6—10 раз.

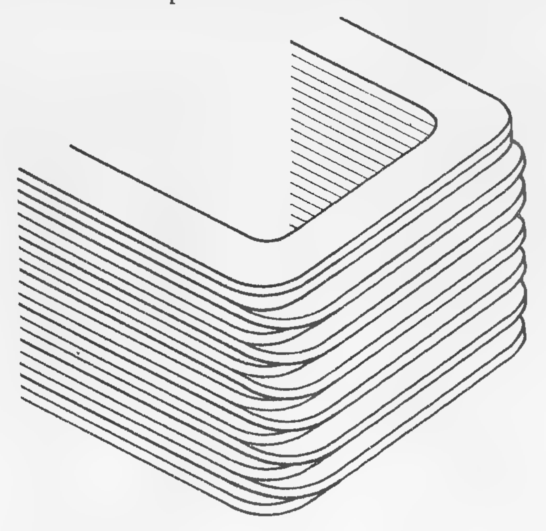


Рис. 1.31. Катушка полюса с выдвинутыми витками

Применение непосредственного газового охлаждения обмоток значительно менее эффективно, но зато упрощает конструкцию обмотки.

Обмотки индукторов синхронных машин, как явнополюсных, так и неявнополюсных, обычно наматываются плашмя в один вертикальный ряд при любом способе охлаждения; только катушки полюсов индукторов очень небольших синхронных машин наматываются в несколько слоев изолированным проводником прямоугольного или даже круглого сечения. В крупных явнополюсных машинах для улучшения охлаждения нередко применяется выдвигание части витков с торцов, как показано на рис. 1.31.

1.6. ЛОБОВЫЕ ЧАСТИ И ИХ КРЕПЛЕНИЯ

Элемент обмотки обычно состоит из двух *активных сторон*, закладываемых в пазы, более или менее удаленные друг от друга,

лобовых частей, из которых одна служит для соединения между собой активных сторон, а другая выполняет такую же роль в том случае, когда элемент состоит более чем из одного витка, и, наконец, *выводов*, служащих для соединения данного элемента с другими такими же или с выводами всей обмотки. В случае если элемент состоит только из одного витка, лобовые части с одной стороны непосредственно переходят целиком в выводы данного элемента.

Короткозамкнутые обмотки роторов асинхронных машин или наконечников явновыраженных полюсов синхронных машин не составляют исключения из этого правила, потому что каждый отдельный стержень таких обмоток можно рассматривать совместно с любым другим, а роль лобовых частей выполняют короткозамыкающие детали — кольца или пластины; только выводы в таких обмотках отсутствуют, поскольку они ни с чем на соединяются.

В наиболее крупных машинах каждый элемент обмотки статора содержит обычно только один виток и выполняется из двух отдельных частей, содержащих одну активную сторону с двумя лобовыми частями, каждая из которых заканчивается выводом; по одну сторону машины соединение выводов образует виток, а по другую сторону соединяются выводы соседних элементов.

В менее крупных машинах и в обмотках возбуждения элементы состоят из более или менее значительного числа витков; в этих условиях лобовые части по обе стороны машины становятся более похожими друг на друга, а выводы — менее заметными. Как правило, выводы всех элементов данной обмотки находятся по одну сторону машины; исключение составляют только катушки обмоток возбуждения явнополюсных синхронных машин, которые часто имеют выводы, расположенные поочередно с разных сторон машины, и некоторые редко применяемые разновидности обмоток статоров крупных машин, рассматриваемые в главе седьмой.

Элементы якорных обмоток, будь то обмотки якорей коллекторных машин, статоров синхронных или асинхронных машин или фазных роторов асинхронных машин, носят название *секций*; многовитковые секции, а также элементы обмоток возбуждения синхронных машин обычно называют *катушками*. Составные части элементов, содержащие только одну активную сторону, нередко называют также *полусекциями*, а в обиходе — *стержнями*, хотя это и неправильно, поскольку под стержнем понимается предмет прямолинейной формы, между тем как такая полусекция помимо прямолинейной активной стороны может иметь изогнутые лобовые части.

В относительно крупных быстроходных машинах, в частности в турбогенераторах, применяются полусекции, имеющие несколько совместно изолированных активных сторон, которые затем соединяются в витки своими выводами по обе стороны машины; в тихоходных машинах такое исполнение обмоток практически не встречается.

При всем разнообразии типов обмоток машин переменного тока их можно разделить на две основные группы:

а) обмотки, состоящие из секций, концентрически охватывающих одна другую; все эти секции имеют различную ширину по активной поверхности сердечника и различную же длину лобовых частей, следовательно, при изготовлении отдельно от сердечника требуют применения такого числа шаблонов, сколько имеется различных форм. В дальнейшем они здесь называются общим термином *концентрические;*

б) обмотки, состоящие из секций, имеющих одинаковую ширину по активной поверхности и укладываемых в пазы с определенными последовательными сдвигами; лобовые части их имеют одинаковую форму, и потому все секции могут быть изготовлены на одном и том же шаблоне. В дальнейшем им здесь приписывается собирательное наименование *равносекционных*.

В отдельных случаях в последней группе обмоток возможна разновидность, у которой часть общего числа секций всей обмотки с одной стороны имеет лобовую часть той же формы, что и у остальных секций, но несколько удлиненную или укороченную.

Далее все обмотки машин переменного тока можно разделить на *однослойные*, у которых в каждом пазу лежит активная сторона только одной секции, и *многослойные*, у которых в каждом пазу лежат активные стороны нескольких секций; в подавляющем большинстве случаев число таких сторон равно двум и обмотки являются *двухслойными*. От них следует отличать конструкции, в которых в одни и те же пазы укладываются разные обмотки, либо вполне одинаковые по типу, схеме соединений, числу витков в секции, поперечному сечению проводников и т. д., либо во всех отношениях совершенно различные.

Как правило, число витков и поперечные сечения проводников всех секций данной обмотки одинаковы; однако встречаются и исключения из этого. Так, например, секции обмоток возбуждения неявнополюсных индукторов могут иметь неравные числа витков, а также состоять из проводников, имеющих различное сечение в зависимости от положения данного проводника в пазу; одновитковые двухслойные обмотки статоров крупных синхронных машин, особенно турбогенераторов, могут иметь различное сечение проводников для верхнего и нижнего слоев и т. д.

Концентрические обмотки почти без исключений выполняются однослойными, но равносекционные могут иметь любое число слоев; в частности, двухслойным обмоткам органически присуще равносекционное выполнение. Характерной особенностью двухслойных обмоток является то, что их лобовые части образуют однородный кольцеобразный венец; со стороны, противоположной выводам секций, невозможно различить какое-бы то ни было членение обмотки, например определить принадлежность каждой

данной секции к той или иной фазе, и лишь в проволочных всыпных обмотках статоров небольших машин между фазами укладываются косынки из мягких изолирующих материалов.

То же самое имеет место в некоторых разновидностях однослойных равносекционных обмоток; но в остальных, особенно в концентрических обмотках, в лобовых частях периодически повторяются различия в форме, которые позволяют отчетливо расчленять обмотку по фазам, полюсам и т. д. В некоторых случаях такое членение выражено настолько сильно, что оказывается возможным разделить сердечник на части, не нарушая обмотку, но лишь разрезая несколько соединений между группами секций, причем не только в обмотках однофазного тока, но и в многофазных обмотках.

Подобные типы обмоток в прежнее время применялись, когда был необходим разъем сердечника, например, в целях транспортировки; им должно быть присвоено наименование *разъемных*, которое не следует смешивать с термином *разрезные обмотки*, имеющим совершенно другое значение. В настоящее время такие обмотки почти не применяются; это определяется не столько значительным возрастанием возможностей транспорта, которые все же не всегда оказываются достаточными для перевозки неразъемных частей машин, как, например, статоров крупных гидрогенераторов, сколько тем, что более целесообразной оказывается укладка секций против мест разъема при сборке на месте установки.

В некоторых случаях применяется выполнение лобовых частей отдельно от активных; последние имеют форму прямых стержней и допускают укладку в пазы вдвиганием сбоку, как, например, в обмотках статора с полузакрытыми пазами (см. рис. 1.4). В настоящее время это исполнение в обмотках статоров практически не встречается, но к нему следует отнести короткозамкнутые обмотки роторов асинхронных двигателей и синхронных машин, а также компенсационные обмотки машин постоянного тока.

Механическая прочность лобовых частей невысока; основой их служат медь или алюминий, т. е. мягкие металлы, к тому же лобовые части обычно состоят из относительно большого числа отдельных проводников более или менее малых сечений, а изоляция практически никакой прочности им не добавляет. Во всяком случае, устойчивость активных сторон, уложенных в пазы и так или иначе закрепленных в них, против действия всевозможных механических сил несравненно выше.

Только в проволочных обмотках небольших машин не применяется укрепление лобовых частей, если не считать перевязку их шнуром или шпагатом с целью лишь предотвращения отставания отдельных проводников от общей их массы или применяемую иногда сплошную обмазку лобовых частей затвердевающими теплопроводными массами с целью предохранения от запыления или других воздействий окружающей среды. Во всех машинах средних, а тем более крупных мощностей принимаются специальные меры по закреплению лобовых частей, подверженных действию вибраций разного происхождения и электродинамическим усилиям, возникающим при различных переходных, в частности аварийных, режимах, когда токи в обмотках принимают значения, многократно превосходящие нормальные эксплуатационные.

В концентрических обмотках статоров машин средней, а иногда и относительно крупной мощности достаточная прочность лобовых частей достигается перевязкой параллельных участков этих частей шнуровыми бандажами, для чего между ними вводятся промежуточные прокладки из твердых изолирующих материалов, как представлено на рис. 1.32.

Рис. 1.32. Крепление лобовых частей концентрических секций

В равносекционных обмотках статоров машин средней и даже относительно крупной мощности применяется подвязка лобовых частей к бандажным кольцам из немагнитного металла, при меньших мощностях — к полым, а при бо́льших — к сплошным. В довольно широких пределах мощности бывает достаточно одного такого кольца, установленного у наиболее отдаленных от сердечника участков лобовых частей, как показано на рис. 1.33, и зачастую ни с какими другими частями машины не связанного.

При более крупных мощностях таких колец применяется несколько, причем они прикрепляются к кронштейнам из немагнитного материала, установленным на корпусе статора или на нажимной плите его сердечника, пример чего дан на рис. 1.34. При этом между наклонными участками лобовых частей вводятся прокладки из твердых изолирующих материалов, хорошо подогнанные к промежуткам между соседними секциями и закрепленные на них шнуровыми бандажами. Эти прокладки наилучшим образом достигают своей цели тогда, когда располагаются правильными рядами, перпендикулярными к наклонным участкам лобовых частей, как показано на

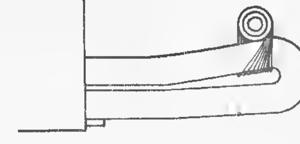
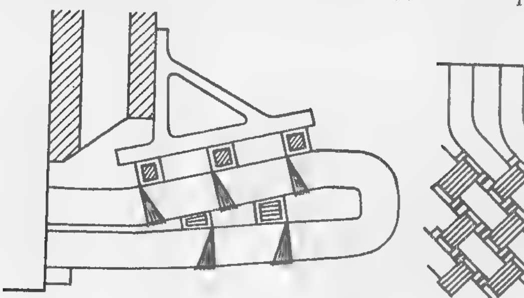


Рис. 1.33. Бандажное кольцо равносекционной обмотки статора

рис. 1.35. Помимо этого между прямолинейными участками лобовых частей непосредственно при выходе из пазов вводятся распорки для предохранения изоляции от излома или надреза об острую кромку паза под действием тангенциальных усилий (рис. 1.36).

Особой сложности достигают крепления лобовых частей обмоток наиболее крупных машин, преимущественно турбогенераторов, которые помимо всего прочего не должны препятствовать свободному удлинению обмотки при ее нагревании, что особенно усложняет их конструкцию; применяемые исполнения чрезвычайно разнообразны и охватить их здесь не представляется возможным.



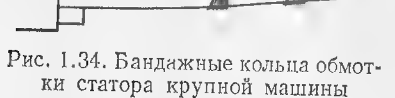


Рис. 1.34. Бандажные кольца обмотки статора крупной машины

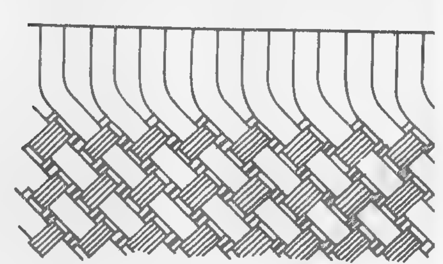


Рис. 1.35. Распорки между лобовыми частями обмотки статора

Пока в электромашиностроении еще не установилось современное общепринятое выполнение обмоток статоров крупных машин в виде равносекционных обмоток, двухслойных или реже однослойных, с незначительным отгибом лобовых частей от оси машины, применялись весьма разнообразные формы крепления лобовых частей накладками из твердых толстослойных изолирующих материалов типа гетинакса или текстолита, усиленных большей частью еще и немагнитными металлическими накладками. Те и другие стянуты немагнитными шпильками, вворачиваемыми в нажимную плиту сердечника, а в наиболее ответственных случаях скреплены между собой либо серьгами, либо даже сплошными кольцами, как представлено на рис. 1.37. В настоящее время крепления подобного рода находят применение в особых специальных случаях.

Иногда в дополнение к механическим креплениям применяется заливка всех промежутков между лобовыми частями затвердевающими пастами холодного или горячего отверждения, что придает всей системе особую монолитность, но крайне затрудняет ремонт обмотки в случае какого-либо ее повреждения.

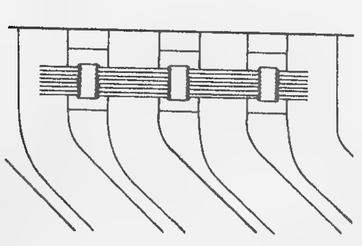


Рис. 1.36. Распорки при выходе обмотки статора из пазов

Лобовые части обмоток на вращающихся частях подвержены действию центробежных сил; при больших окружных скоростях эти силы могут быть настолько значительными, что борьба с ними представляет одну из труднейших задач электромашиностроения.

Крепление лобовых частей обмоток фазных роторов асинхронных машин при умеренных окружных скоростях производится так же, как и якорных обмоток постоянного тока и роторных обмоток коллекторных машин, бандажами из немагнитной проволоки, а в последнее время — из нетканого стекловолокна; но при значительных окружных скоростях более целесообразно применение

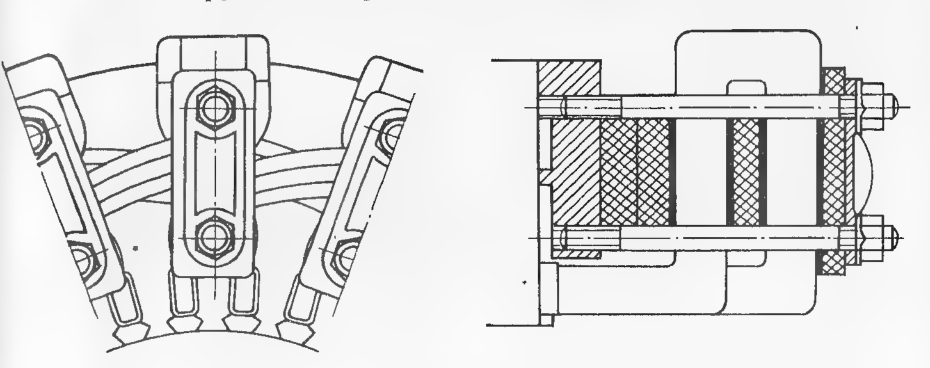


Рис. 1.37. Крепление лобовых частей в плоскостях, параллельных торцу сердечника

бандажных колец, кованных из немагнитной стали или бронзовых, похожих на упоминаемые ниже бандажные кольца неявнополюсных индукторов синхронных машин.

Короткозамыкающие кольца обмоток роторов асинхронных двигателей и короткозамыкающие пластины обмоток в наконечниках явновыраженных полюсов синхронных машин большей частью достаточно прочны, чтобы противостоять действию центробежных сил; иногда в дополнительных креплениях нуждаются лишь перемычки, соединяющие между собой короткозамыкающие пластины отдельных полюсов в электрически замкнутые кольца (следует отметить, что встречаются исполнения синхронных машин без таких перемычек). Но при больших значениях окружной скорости приходится усиливать короткозамыкающие кольца коваными бандажными кольцами из стали, магнитной или немагнитной. Эти кольца, обычно не изолированные по отношению к короткозамыкающим, создают дополнительную проводимость, которая должна учитываться при расчете, а в случае изготовления из магнитной стали они еще увеличивают индуктивное сопротивление короткозамыкающих колец, что может оказывать нежелательное влияние на свойства машины.

Обмотки возбуждения неявнополюсных роторов синхронных машин отличаются сильно развитыми лобовыми частями; по-

скольку такие машины быстроходны (за исключением единичных случаев изготовления многополюсных машин с неявновыраженными полюсами), эти лобовые части нуждаются в очень надежном закреплении. На ранних стадиях развития электромашиностроения некоторыми фирмами применялись для этой цели проволочные бандажи, но в настоящее время они совершенно вышли из употребления и применяются исключительно кованые бандажные кольца, как правило, из немагнитных сталей с высокими механическими качествами. Применение для этой цели магнитных сталей практиковалось еще в сравнительно недавнее время для машин небольшой мощности, но теперь почти не встречается. Пока черная металлургия испытывала затруднения в изготовлении более или менее крупных поковок из немагнитных сталей и они были очень дороги, применялось составление бандажных колец из двух частей — немагнитной, ближайшей к активным частям индуктора, и магнитной, более удаленной от них, но и это в настоящее время встречается редко.

Конструкция бандажных колец неявнополюсных индукторов, вернее, способов их посадки на индуктор, чрезвычайно разнообразна, и здесь не представляется возможным ее рассматривать; остается лишь добавить, что в последнее время намечается тенденция замены немагнитной стали титаном — немагнитным металлом меньшей плотности при весьма высоких механических качествах.

Обмотки возбуждения явнополюсных индукторов синхронных машин при больших числах пар полюсов вполне достаточно удерживаются краями полюсных наконечников, а с торцов полюсов — полюсными щеками; но при малых числах пар полюсов направление центробежных сил, действующих на обмотку, становится сильно отклоняющимся от перпендикулярного к нижним поверхностям полюсных наконечников, в результате чего появляются усилия, стремящиеся сдвигать обмотку по этим поверхностям. В таких случаях для удержания обмотки на месте между полюсами вставляются клинообразные распорки из немагнитного материала, притягиваемые к сердечнику ротора, как представлено на рис. 1.38.

В заключение следует упомянуть о лобовых частях обмоток с непосредственным охлаждением, в которых детали, служащие для соединения проводников, одновременно должны выполнять функцию подведения охлаждающей среды к внутрипроводниковым каналам и отвода ее.

Рис. 1.38. Распорка индуктора явнополюсной машины

При газовом охлаждении газ должен протекать одновременно через все проводники от одного конца машины, где на ее вал насажен соответствующий компрессор, до другого, где газ из камеры лобовых частей направляется в газоохладители. Для упорядочения движения газа все наконечники, соединяющие стержни обмотки, снабжаются раструбами из изолирующего материала.

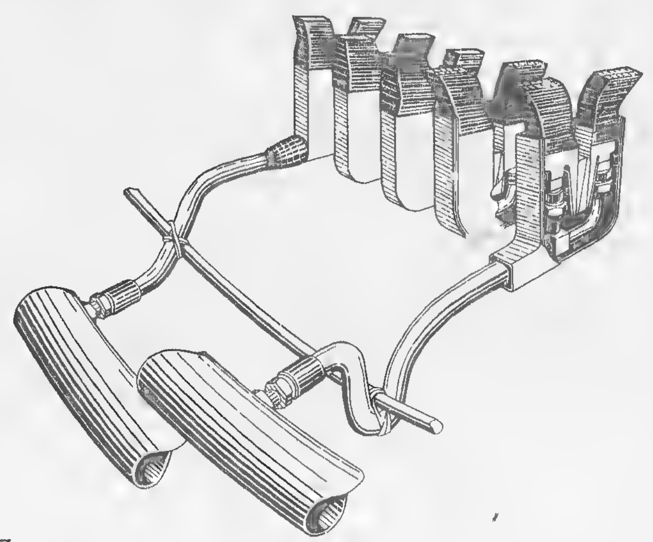


Рис. 1.39. Пример системы непосредственного жидкостного охлаждения обмотки статора гидрогенератора

При непосредственном жидкостном охлаждении в зависимости от размеров машины возможны различные схемы соединений обмотки по отношению к охлаждающей жидкости. В машинах самой большой длины все стержни обмотки соединяются параллельно и обтекаются жидкостью в одном и том же направлении, а напорный и сливной коллекторы располагаются по разные стороны машины. В машинах несколько меньшей длины оказывается возможным соединять по два стержня последовательно, и в этом случае оба коллектора располагаются с одной и той же стороны машины, преимущественно противоположной выводам обмотки, где камера лобовых частей не загружена соединениями. Наконец, в машинах еще меньшей длины, как, например, в гидрогенераторах, бывает возможным соединять последовательно несколько витков обмотки по охлаждающей жидкости — обычно от четырех до шести. На рис. 1.39 показан пример такого рода схемы охлаждения, на котором достаточно ясно видны все детали устройства.

Конструктивное оформление систем непосредственного охлаждения обмоток якорей турбогенераторов, а в последнее время

также и гидрогенераторов отличается большим разнообразием; еще более разнообразны детали систем непосредственного жидкостного охлаждения обмоток индукторов крупных синхронных машин всех видов. В отдельных случаях непосредственное жидкостное охлаждение находит применение и в машинах других видов — асинхронных и постоянного тока, однако рассмотреть все это не представляется здесь возможным.

Глава вторая

ТИПЫ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

2.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ОБМОТОК

Обмотки электрических машин изображаются *схемами*, позволяющими судить об их устройстве, электрических и электромагнитных свойствах. Существует два основных способа выполнения схем обмоток: *круговые* схемы и *развернутые*.

При круговых схемах уложенные в пазы активные стороны обмотки изображаются отрезками радиальных прямых, а лобовые части — так, чтобы по возможности отражать их действительную форму. При этом, очевидно, лобовые части по одну сторону машины оказываются внутри кольцевой зоны, занятой активными сторонами, а по другую сторону — вне этой зоны. Как правило, круговые схемы обмоток, соединенных с коллекторами, изображаются с коллектором внутри схемы; это более наглядно, но несколько трудно выполнимо для обмоток с малыми числами полюсов, у которых лобовые части оставляют мало места для изображения коллектора. Напротив, обмотки, не соединяемые с коллекторами, обычно изображаются так, что все соединения между отдельными элементами и их сочетаниями выносятся наружу, где могут быть вполне отчетливыми. Круговые схемы в целом очень наглядны, но трудоемки в исполнении и громоздки.

При развернутых схемах активные стороны элементов обмотки представляются отрезками параллельных прямых, занимающими полосу, изображающую активную поверхность сердечника; последняя разрезана по одной из своих образующих, развернута в плоскость и рассматривается всегда со стороны зазора. Как и в круговых схемах, лобовые части по возможности отображают действительную их форму; как для обмоток, соединенных с коллекторами, так и для всяких иных соединения размещаются в нижней части схемы.

Обычно на схему наносится нумерация пазов; здесь она принята для круговых схем — в направлении часовой стрелки, а для развернутых — слева направо. Таким образом, для обмоток, соединенных с коллекторами, нумерация на схемах обоих видов

совпадает, но для прочих обмоток получается различной, если в круговой схеме соединения нанесены с наружной стороны, как было указано выше. В этом состоит еще одно неудобство круговых схем, из-за которого пользование ими ограничивается преимущественно теми случаями, в которых нумерация пазов не играет роли, и учебными целями.

Если обмотка имеет несколько слоев, то активные стороны ее элементов, находящиеся в одном и том же пазу, изображаются параллельными отрезками; здесь принято, что в схемах обмоток переменного тока справа помещается сторона секции, лежащая на дне паза, и слева — находящаяся под клином, а в схемах обмоток коллекторных якорей — наоборот.

Иногда бывает удобнее изображать активные стороны не отрезками прямых, а кружками, символизирующими поперечные сечения этих сторон. В этом случае, если обмотка имеет несколько слоев, то кружки располагаются друг под другом соответственно действительному размещению сторон элементов; такой способ применяется и в круговых схемах, и в развернутых. Нередко встречается упрощенное изображение обмотки, при котором наносятся только кружки и лобовые части со стороны, противоположной соединениям; оно применяется тогда, когда способ соединения элементов обмотки друг с другом не играет роли для рассматриваемого вопроса. Применяется и еще более упрощенное — топографическое — изображение обмотки, в котором только какимнибудь условным образом намечены участки, занятые той или иной обмоткой, без указания их внутреннего устройства. Наконец, когда интерес представляет только порядок размещения в пазах сторон секций, принадлежащих к разным фазам или частям одной и той же фазы, с успехом применяется изображение этого размещения буквенными или цифровыми символами, вообще устраняющее всякое черчение. Несколько иное назначение имеют так называемые *таблицы* обмоток, рассматриваемые в шестой главе. В дальнейшем в книге применяются все перечисленные разновидности изображения обмоток в зависимости от удобств, которые каждая из них представляет для того или иного случая. На рис. 2.1 для сравнения показано изображение одной и той же обмотки однофазного тока всеми перечисленными способами.

Элементы обмоток, имеющие каждый два или более витков, в полных схемах выражаются в виде замкнутых фигур, подобных действительной форме этих элементов, а их соединения между собой — волосными линиями; но в случае одновитковых элементов каждый из них переходит в следующий непрерывно, а соединения элементов и их групп выполняются линиями той же толщины, что и сами элементы.

Электрические свойства обмотки не зависят от числа витков в ее элементах, но схема обмотки, состоящей из одновитковых элементов, всегда нагляднее схемы обмотки из многовитковых элементов — в ней гораздо легче прослеживаются все соединения

и ход обмотки от начала к концу; по этой причине в этой книге подавляющее большинство схем выполнено так, как если бы изображаемые ими обмотки были из одновитковых элементов, что нисколько не препятствует полной строгости всех рассуждений.

При этом применяются условные обозначения фаз линиями разного вида; здесь в дальнейшем фаза, принимаемая за первую, изображается жирными сплошными линиями, вторая — тонкими сплошными линиями и третья — тонкими штриховыми, причем направление вращения, если это не оговорено особо, принимается в круговых схемах по часовой стрелке, а в развернутых — слева направо. Если число фаз больше трех, то их условные обозначения объясняются отдельно; пазы без обмотки изображаются пунктиром.

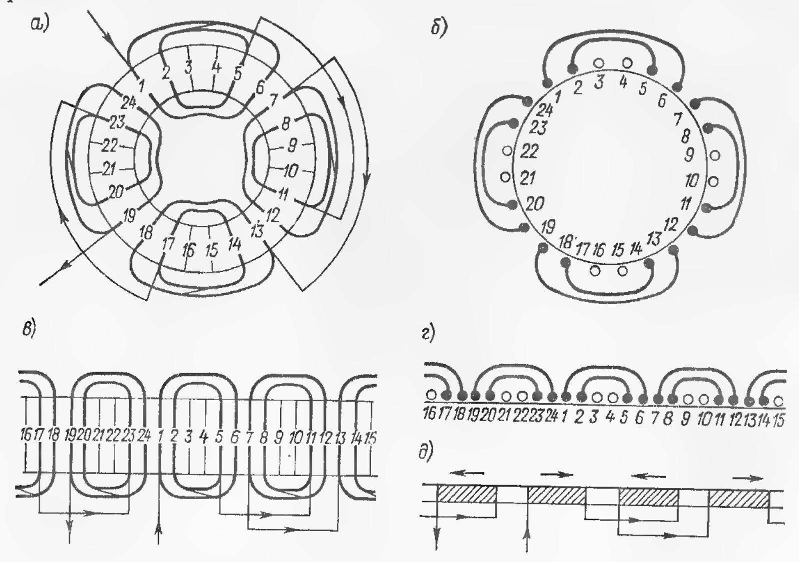


Рис. 2.1. Различные способы изображения схемы обмотки

В схемах, применяемых при изготовлении машин на производстве, изображаются все фазы обмотки, а обозначение фаз линиями разного вида обычно не применяется; но при изучении свойств обмоток сплошное заполнение линиями, хотя бы и разного вида, делает схему трудно читаемой. Между тем по причине полной симметричности всех фаз вполне достаточно изобразить полностью только одну фазу, а для остальных лишь наметить расположение их элементов в пазах, применяя вышеуказанные условные обозначения; именно так в этой книге выполнено большинство схем.

Очень широко здесь применяются упрощенные схемы с односторонними лобовыми частями, подобные схемам на рис. 2.1, *б* и *г*; после нанесения одной фазы для прочих останутся только

пустые кружки. В этом случае для обозначения принадлежности их к разным фазам в этой книге применяется: для первой фазы — сплошная заливка тушью, а для двух прочих фаз — крестики и точки, обычно используемые для обозначения направления тока в проводниках, перпендикулярных плоскости чертежа; но по своему прямому назначению они здесь не применяются. Пазы, не заполненные обмоткой, изображаются при этом пустыми кружками.

Существенное различие между обмотками, соединяемыми с коллекторами, и бесколлекторными обмотками состоит в том, что в первых соединение отдельных элементов за редким исключением производится непрерывно по всей окружности одним и тем же способом, так что в результате вся обмотка представляется замкнутым непрерывным целым, не имеющим ни начала, ни конца. Между тем бесколлекторные обмотки, как правило, состоят из отдельных групп элементов, внутри которых каждый элемент соединяется с соседним, а затем уже производится соединение между собой различных групп тем или иным способом сначала в пределах одной фазы, а далее, если это нужно, то и между фазами, например в звезду или в многоугольник.

При этом различают начала H и концы K обмоток разных фаз; выбор их является условным, но если для одной фазы он может быть вполне произвольным, то для всех прочих будет определяться тем, что сдвиги между фазами должны соответствовать фазному углу, т. е., например, в обмотке трехфазного тока 120°. Здесь началом первой фазы обмотки многофазного тока считается вывод стороны элемента, лежащей в нижнем слое паза с номером *1*.

Эти обозначения не совпадают с установленными стандартами для маркировки выводов электрических машин, которые привязаны к месту нахождения обмотки на той или иной части машины; здесь это было бы неудобно, поскольку в весьма многих случаях обмотка рассматривается независимо от того, на какой именно части машины она находится. Стрелки, нанесенные на многих схемах, обозначают направления обходов обмотки всегда от начала фазы H к ее концу K, но не направления токов.

Простейшим способом соединения между собой отдельных групп элементов одной и той же фазы является их последовательное соединение; естественно, оно должно производиться так, чтобы при непрерывном обходе всех групп электрические и магнитные явления имели одну и ту же направленность, так как в противном случае отдельные группы будут частично или полностью компенсировать друг друга. Так, например, электродвижущие силы в различных группах должны складываться друг с другом, но не быть встречными.

При этом отдельные группы могут иметь либо одинаковый состав, либо более или менее различный; группы даже одинакового состава могут быть расположены на окружности либо с одинаковыми интервалами, либо с неодинаковыми; при неодинаковом

составе групп интервалы между ними, как правило, тоже неодинаковы. В результате даже при совершенно одинаковом распределении магнитного поля индуктора на всех полюсных делениях электродвижущие силы, индуктированные этим полем в различных группах элементов обмотки, могут оказаться не только неодинаковыми по значению, но и более или менее значительно сдвинутыми между собой по фазе; это, однако, не препятствует последовательному соединению групп элементов обмотки.

Но далеко не всегда все группы элементов одной и той же фазы могут быть соединены последовательно; так, например, номинальное значение тока данной обмотки может быть настолько большим, что даже при минимальном числе витков в каждом элементе, т. е. при одновитковых элементах, не представляется возможным иметь достаточное поперечное сечение проводника. В этом случае не остается иного выхода, как прибегнуть к параллельному соединению групп элементов между собой.

Для устранения уравнительных токов параллельно соединяемые части обмотки должны быть во всех отношениях одинаковыми, т. е. состоять из одного и того же числа групп элементов, равномерно распределенных по окружности машины. В идеальном случае лобовые части всех таких групп тоже должны быть одинаковыми, так как иначе, имея различную длину и форму, они будут обладать различными сопротивлениями, как активными, так и особенно индуктивными, способными нарушить правильное распределение тока. Это условие большей частью, хотя и не всегда, выполняется в равносекционных обмотках, но обычно нарушается в концентрических.

Однако даже в самом идеальном случае, при полной идентичности всех параллельных ветвей, возможно возникновение уравнительных токов. Так, например, поле индуктора может оказаться не вполне одинаковым на разных полюсных делениях; причина этого заключается не столько в каких-либо различиях в самом индукторе (хотя и это не исключено), сколько в неравномерности зазора между индуктором и якорем. Даже при отличном расположении всех полюсов по отношению к оси вращения индуктора сама эта ось может быть смещена по отношению к оси якоря, так что зазор получается неравномерным. Естественно, что поле сильнее в местах с меньшим зазором, и наоборот.

Мерой по устранению уравнительных токов в этих условиях служит такое распределение групп элементов обмотки между параллельными ветвями, при котором группы, входящие в состав каждой параллельной ветви, равномерно расположены по окружности. В качестве простейшего примера на рис. 2.2, *а* представлена восьмиполюсная обмотка, состоящая из четырех групп концентрических секций, соединенных в две параллельные ветви так, что в состав каждой из них входит по две группы, лежащие диаметрально друг против друга. Неравномерность зазора символически изображена эксцентричной окружностью; видно, что

в одной параллельной ветви одна группа лежит при наименьшем зазоре, а другая — при наибольшем, между тем как в другой ветви обе составляющие ее группы в этом отношении расположены примерно одинаково.

Напротив, если составить параллельные ветви из групп, лежащих рядом, то обе группы одной ветви попадают в места с наименьшим зазором, а группы другой ветви — с наибольшим, как это видно на рис. 2.2, *б*. Хотя состав обеих ветвей вполне одинаков, уравнительные токи между ними неизбежны. Если же и при двух параллельных ветвях обмотку выполнить невозможно и нужно сделать четыре параллельные ветви, то в каждую из них войдет только одна группа и все они окажутся лежащими в местах с различными зазорами.

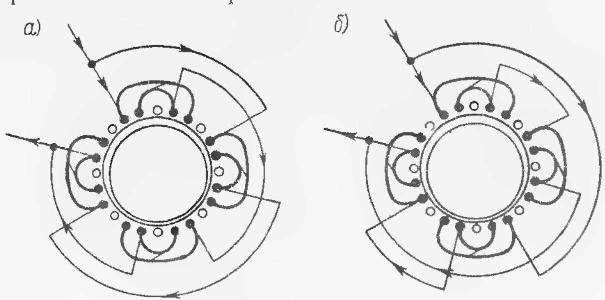


Рис. 2.2. Параллельные ветви обмотки

Влияние неравномерности зазора тем сильнее, чем меньше сам зазор; это ясно из того, что распределение магнитного поля зависит от относительной неравномерности зазора, а не от абсолютной; следовательно, чем зазор больше, тем меньше вероятность его неравномерности. Поэтому в таких машинах, для которых характерны большие значения зазора, как, например, в турбогенераторах, все приведенные выше соображения теряют остроту; они наиболее существенны для машин с малым зазором, т. е. прежде всего для асинхронных машин, но и для синхронных машин, особенно многополюсных с относительно небольшими зазорами, пренебрегать ими не следует.

Однако в ряде случаев при составлении схемы обмотки отнюдь не ставится задача выравнивания распределения токов между параллельными ветвями; напротив, сама их неравномерность используется для выравнивания распределения результирующего магнитного поля машины, образуемого совместным действием магнитодвижущих сил как части машины, несущей на себе данную обмотку, например якоря, так и противоположной части, например индуктора. Таким образом, здесь пока нет возможности дать раз навсегда установленные рекомендации по составлению параллельных ветвей обмоток; этот вопрос должен решаться сообразно условиям их работы.

2.2. КОНЦЕНТРИЧЕСКИЕ ОБМОТКИ ОДНОФАЗНОГО ТОКА

В настоящее время бесколлекторные машины однофазного тока, главным образом небольшой мощности, находят применение лишь в отдельных специальных случаях; если же приходится встречаться с такими машинами более или менее значительной мощности, то зачастую они снабжаются полными обмотками трехфазного тока, сопряженными в звезду, причем две фазы рассматриваются как обмотка однофазного тока, а третья фаза — как 50 %-ный резерв. Это позволяет применять для обмоток машин однофазного тока те же формы, что и для машин трехфазного тока, если нет особых причин, заставляющих обратиться к специальным формам.

Однако с точки зрения классификации форм выполнения обмоток целесообразно начать с рассмотрения именно обмоток однофазного тока, на которых можно ясно проследить эволюцию этих форм. Кроме того, устройство обмоток возбуждения неявнополюсных индукторов принципиально не отличается от устройства обмоток однофазного тока и потому представляет самостоятельный интерес; ниже им отведено особое место.

Всякая обмотка характеризуется тремя параметрами: числом пар полюсов p, общим числом пазов на окружности данной части машины Z и числом пазов q, которое на каждом полюсном делении занимает данная обмотка; оно обычно меньше числа пазов на один полюс $Q = Z/(2p)$, поскольку часть пазов остается необмотанной. Отношение q/Q может быть различным, но обычно имеет значение, более или менее близкое к 2/3.

Число пар полюсов в электрической машине обычно является целым; это, однако, не распространяется на такие машины, у которых сердечник, несущий данную обмотку, представляет лишь отрезок кольца, а также на линейные электрические машины, которые в дальнейшем здесь не рассматриваются. Общее число пазов на окружности тоже является целым, причем в сердечниках, состоящих из штампованных листов электротехнической стали, в подавляющем большинстве случаев пазы равномерно распределяются по окружности независимо от того, будут ли они все заполнены обмоткой или же часть их останется незаполненной; но это не распространяется на обмотки возбуждения неявнополюсных индукторов, укладываемых во фрезерованные пазы массивного сердечника, а также на короткозамкнутые обмотки в наконечниках явновыраженных полюсов. Что касается числа обмотанных пазов обмоток однофазного тока или числа пазов на полюс и фазу обмоток многофазного тока, то оно может быть как целым, так и дробным. Здесь пока рассматриваются обмотки с целыми числами q, у которых вся обмотка или каждая ее фаза на каждом полюсном делении занимает одно и то же число пазов.

Простейшей является обмотка, занимающая на каждом полюсном делении только один паз: $q = 1$. Такие обмотки применяются

только в машинах весьма малой мощности, так как отличаются, как это будет видно в дальнейшем, очень низкими электрическими и электромагнитными качествами; но в ряде случаев бывает удобно начинать рассмотрение именно с них, и это здесь неоднократно применяется. Нормально нижним пределом целого числа q является 2; указать верхний его предел было бы несколько затруднительно — в отдельных случаях он может быть настолько значительным, что бывает удобно принять его равным бесконечности.

Наиболее примитивной формой исполнения обмотки однофазного тока является *концентрическая*, показанная на рис. 2.3, *а* для случая $p = 3$ и $q = 4$. Как видно из этого рисунка, обмотка состоит из трех групп секций по четыре в каждой, концентрически охватывающих друг друга, с сосредоточенными лобовыми частями. Внутри каждой группы и в промежутках между соседними группами остались необмотанными несколько пазов, в данном случае по два паза; общее число пазов на окружности $Z = 36$. Достоинством этой обмотки является то, что в проволочном всыпном исполнении она может быть заготовлена непрерывной намоткой каждой группы секций на четырех шаблонах с постепенно возрастающими размерами, которые затем поочередно укладываются в пазы, начиная с наименьшего; недостатком же — то, что лобовые части образуют толстый пучок и имеют относительно большой вылет. Данная обмотка в случае надобности может быть соединена в три параллельные ветви, которые при неравномерном зазоре окажутся в неодинаковых условиях.

Эти недостатки устранены видоизменением обмотки, представленным на рис. 2.3, *б*; здесь пазы заполнены так же, как в предыдущей, но вместо трех групп из четырех секций сделано шесть групп из двух секций. Лобовые части всех секций такие же, как у двух внутренних секций предыдущей формы, т. е. имеют значительно меньший вылет; правда, число групп удвоилось, но зато в каждой из них секций стало вдвое меньше, что облегчает укладку. Сократилось вдвое число шаблонов для намотки секций, а число параллельных ветвей может быть принято равным не только трем, как в предыдущем случае, но и двум, причем в обоих случаях ветви можно составить из групп, в среднем находящихся примерно в одинаковых условиях. В случае необходимости число параллельных ветвей может быть доведено до шести, т. е. сделано равным числу полюсов $2p$.

Такое исполнение обмотки, при котором на каждом полюсном делении лежащие рядом секции имеют отгиб лобовых частей в противоположные стороны, носит название исполнения *вразвалку*. Вообще же всевозможные видоизменения лобовых частей при одном и том же заполнении пазов в дальнейшем будут называться здесь *модификациями* обмотки того или иного типа.

Исполнение вразвалку может быть применено не только при четном числе q, но и при нечетном; в этом случае, очевидно, группы

секций будут поочередно состоять из чисел секций, различающихся на единицу; например, при $q = 5$ они будут содержать либо две, либо три секции. Понятно, что при этом исполнение вразвалку

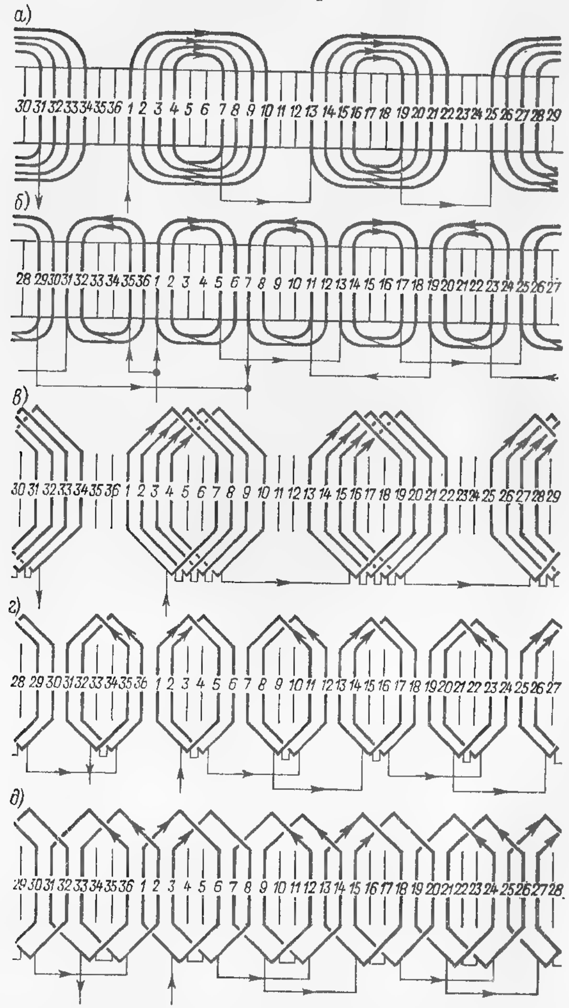


Рис. 2.3. Модификации лобовых частей обмотки однофазного тока: *а* — концентрическая обмотка с сосредоточенными лобовыми частями; *б* — то же с лобовыми частями вразвалку; *в* — равносекционная обмотка с сосредоточенными лобовыми частями; *г* — то же с лобовыми частями вразвалку; *д* — то же с чередующимися секциями

уже не даст возможности увеличить число параллельных ветвей по сравнению с исполнением сосредоточенными группами из q секций, но прочие преимущества его сохраняются.

2.3. РАВНОСЕКЦИОННЫЕ ОБМОТКИ ОДНОФАЗНОГО ТОКА

Одним из существенных преимуществ модификации вразвалку выше было указано уменьшение вдвое числа шаблонов, необходимых для изготовления секций, а также уменьшение вылета лобовых частей; тем не менее при высоких значениях числа обмотанных пазов q число шаблонов все же еще остается большим; и только при $q = 2$ можно ограничиться одним-единственным шаблоном для всех секций обмотки. Последнее преимущество настолько важно, что желательно распространить его на обмотки с любыми значениями q.

На рис. 2.3, *в* показано, как обмотка с теми же данными, что и на рис. 2.3, *а*, может быть выполнена секциями одинаковой формы и размеров. Подобно предыдущему, здесь можно применить модификацию вразвалку, представленную на рис. 2.3, *г*. Как и при концентрических секциях, последняя дает меньший вылет лобовых частей, поскольку ширина секций при ней меньше; в отношении возможного числа параллельных ветвей здесь можно сказать то же, что и раньше.

Все рассмотренные до сих пор модификации отличались общим признаком: активные стороны секций, составляющих группу, находились в соседних пазах. Это, однако, не является строго обязательным; на рис. 2.3, *д* показана модификация, в которой такие пазы не являются соседними, но чередуются через один. Ширина секций и их вылет здесь меньше, чем на рис. 2.3, *в*, но больше, чем на рис. 2.3, *г*; зато промежутки между лобовыми частями могут быть сделаны бо́льшими, чем там, и это будет способствовать лучшему охлаждению последних, или же, сохраняя те же расстояния между лобовыми частями, их можно несколько укоротить и тем самым уменьшить вылет.

Отличие последней модификации от всех предыдущих состоит в том, что здесь отсутствуют не перекрываемые лобовыми частями участки, по которым в случае надобности можно устроить разъемы сердечника, не нарушающие обмотку; впрочем, в настоящее время это не считается существенным фактором. К ее недостаткам следует отнести то, что лобовые части некоторых секций должны обходить лобовые части других секций, лежащих в соседних пазах, что усложняет их форму; поскольку по условию шаблон должен быть одним и тем же для всех секций, такая же форма должна сохраняться и в тех местах, где перекрещиваний нет. В предыдущих двух модификациях перекрещивания лобовых частей тоже существуют, но они отнесены дальше от сердечника и потому их легче выполнить.

При нечетных числах обмотанных пазов q модификации с сосредоточенными лобовыми частями (рис. 2.3, *в*), а также с чередующимися пазами (рис. 2.3, *д*) выполняются беспрепятственно; первое очевидно, второе же показано на рис. 2.4. Однако в последнем

случае число параллельных ветвей не может быть сделано равным числу полюсов, как в модификациях на рис. 2.3, *г* и *д*, потому что в состав каждой параллельной ветви должно входить по крайней мере по одной группе из большего числа секций, в данном случае 3, и по одной группе из меньшего числа секций, здесь 2, соединенных между собой последовательно.

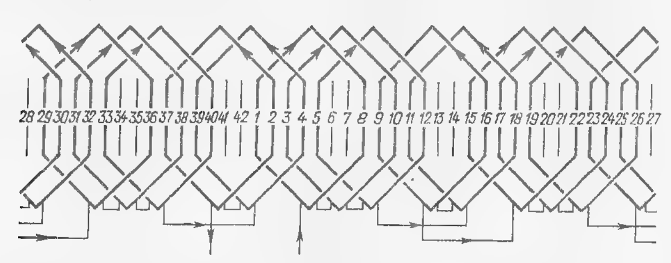


Рис. 2.4. Равносекционная обмотка однофазного тока с чередующимися пазами при нечетном числе пазов на полюс и фазу

Здесь стоит обратить внимание на одно обстоятельство. При четном числе обмотанных пазов q в модификации с сосредоточеными лобовыми частями ширина секций равна полюсному делению, но в модификации вразвалку она меньше полюсного деления на число зубцовых делений, равное половине q, а в модификации с чередующимися пазами ширина секций меньше полюсного деления на одно зубцовое деление. При этом все рассмотренные модификации характеризуются тем, что обмотанные и необмотанные пазы чередуются сплошными группами. При нечетном числе обмотанных пазов в модификации с чередующимися пазами ширина секций равна полюсному делению.

Теперь можно поступить следующим образом: ширину секций принять на два зубцовых деления меньшей, чем это следовало бы сделать в модификации с чередующимися пазами, и заложить, например, левые стороны всех секций в те же пазы, что и раньше; тогда правые стороны попадут уже не в те пазы, в которых они находились до этого, а в другие. На рис. 2.5 показан результат такого преобразования при четном числе обмотанных пазов, равном 6; из него видно, что теперь обмотанные и необмотанные пазы уже не чередуются сплошными группами, однако расположение обмотанных пазов на всех полюсных делениях остается одинаковым: 1—0—1—1—1—1—0—1.

Из прочих обмоток однофазного тока следует упомянуть об

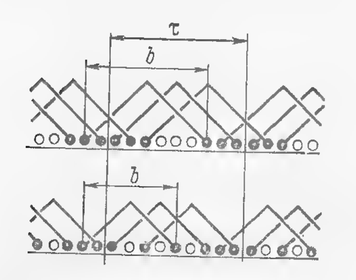


Рис. 2.5. Укорочение шага равносекционной обмотки при четном числе пазов на полюс

обмотках коллекторных машин переменного тока: обмотки их роторов ничем не отличаются от обмоток якорей машин постоянного тока и, следовательно, тоже относятся к равносекционным.

2.4. ОДНОСЛОЙНЫЕ КОНЦЕНТРИЧЕСКИЕ ОБМОТКИ МНОГОФАЗНОГО ТОКА

Всякая обмотка многофазного тока с числом фаз m является сочетанием на общем сердечнике m одинаковых обмоток однофазного тока; если каждая из них на каждом полюсном делении занимает q пазов, то на долю одного полюсного деления должно приходиться mq пазов, а их общее число на окружности равно

$$Z = 2pmq.$$

Таким образом, условием выполнимости обмотки многофазного тока является делимость общего числа пазов Z на удвоенное произведение числа фаз и числа пар полюсов. Поэтому число q здесь получает название *числа пазов на полюс и фазу;* им в первую очередь определяются электрические и магнитные свойства обмоток.

Следует отметить, что под одинаковостью m обмоток однофазного тока, образующих обмотку m-фазного тока, здесь пока приходится понимать лишь одинаковость распределения их по пазам; если потребовать полной одинаковости обмоток всех фаз, включая форму и размеры лобовых частей, то окажется, что обмотки, вполне симметричные относительно всех фаз, возможны только в отдельных случаях, число которых уменьшается с увеличением числа фаз и с уменьшением числа пар полюсов. При этом могут встречаться случаи, когда при данных числах фаз и пар полюсов получение вполне симметричной обмотки в одной модификации невозможно, в то время как другая модификация способна дать вполне симметричную обмотку именно только при этих числах.

При наложении на один и тот же сердечник обмоток нескольких фаз неизбежно перекрещивание их лобовых частей, следовательно, в некоторых группах секций лобовые части должны отгибаться таким образом, чтобы пропустить мимо себя лобовые части других групп; иными словами, формы секций в группах должны быть различны. При этом лобовые части образуют ясно различимые ярусы; по числу таких ярусов обмотки с концентрическими секциями могут быть двухъярусными, трехъярусными и т. д.

Иногда в учебной литературе встречаются термины «двухплоскостные обмотки», «трехплоскостные обмотки»; это, однако, неправильно, потому что далеко не всегда лобовые части располагаются в плоскостях, параллельных торцу сердечника, — это более или менее характерно для быстроходных крупных машин, главным образом двухполюсных; в целом же чаще встречается

расположение лобовых частей на поверхностях конусов с различными углами при вершине.

Для того чтобы получить обмотку двухфазного тока, необходимо наложить на сердечник две одинаковые однофазные обмотки, каждая из которых заполняет на каждом полюсном делении ровно половину числа пазов. Следовательно, если речь идет о концентрических обмотках, то как интервалы между группами секций одной фазы, так и не обмотанные данной фазой промежутки внутри этих групп должны содержать по одному и тому же числу пазов q. Однако встретить в настоящее время такие обмотки трудно, поскольку двухфазные системы для передачи энергии полностью вышли из употребления и применяются только в отдельных специальных случаях.

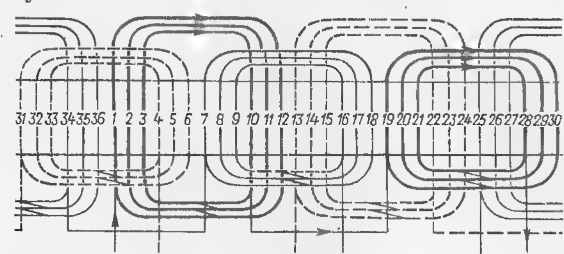


Рис. 2.6. Обмотка трехфазного тока с концентрическими лобовыми частями в двух ярусах

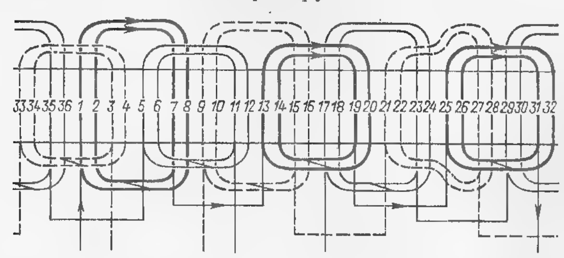


Рис. 2.7. Обмотка трехфазного тока с лобовыми частями в двух ярусах при нечетном числе пар полюсов

Обмотка трехфазного тока состоит из трех обмоток однофазного тока, каждая из которых заполняет на каждом полюсном делении только одну треть пазов, расположенных на дуге 60° эл., оставляя две другие трети на долю прочих фаз. На рис. 2.6 дана схема обмотки трехфазного тока с числом пар полюсов $p = 2$ и числом пазов на полюс и фазу $q = 3$ с лобовыми частями в двух ярусах; из него видно, что любая фаза содержит по одной группе секций внутреннего яруса и по одной — наружного и потому вполне симметрична относительно всех фаз. Очевидно, то же самое будет и при любом большем четном числе пар полюсов.

Попытка выполнить шестиполюсную обмотку на сердечнике с тем же общим числом пазов $Z = 36$, что и у предыдущей, пред-

ставленная на рис. 2.7, показывает, что нельзя распределить группы секций всех фаз поровну между двумя ярусами, так как их числа нечетны. В результате в одной фазе содержится одна группа секций наружного яруса и две группы внутреннего, в другой фазе — две группы наружного яруса и одна внутреннего, а в третьей — по одной группе наружного и внутреннего ярусов;

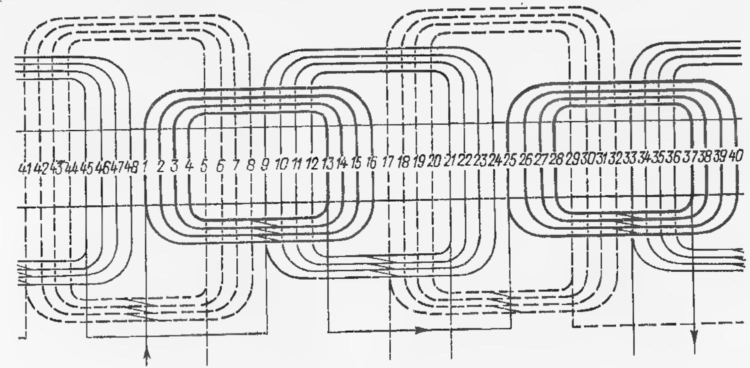


Рис. 2.8. Обмотка трехфазного тока с концентрическими лобовыми частями в трех ярусах

третья же группа этой фазы должна принадлежать одной стороной к наружному ярусу, а другой — к внутреннему, т. е. является переходной формой, которую зачастую называют *кривой*. О полной симметричности такой обмотки говорить не приходится; правда, получающаяся несимметричность сглаживается при воз-

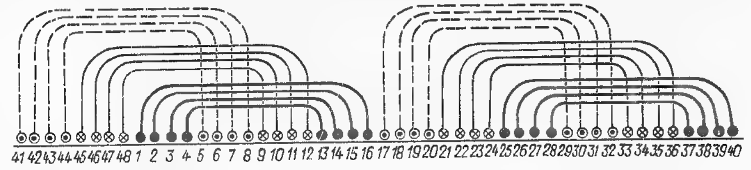


Рис. 2.9. Обмотка трехфазного тока с лобовыми частями в трех ярусах и возможностью разъема сердечника

растании числа пар полюсов, но при любом нечетном числе все же остается. Модификация вразвалку при двухъярусном исполнении лобовых частей невозможна; она становится осуществимой только при переходе к трехъярусному исполнению.

Трехъярусное исполнение обладает некоторыми особенностями, резко отличающими его от двухъярусного. На рис. 2.8 дана часть схемы обмотки трехфазного тока с сосредоточенными группами секций при четном числе пазов на полюс и фазу $q = 4$. Ее видоизменение, представленное на рис. 2.9, дает возможность разъема сердечника на части, содержащие только два полюсных деления; в частности, подобная форма обмотки широко применялась для разъемных статоров четырехполюсных турбогенераторов.

Здесь все группы секций любой фазы принадлежат только к какому-нибудь одному ярусу, т. е. обмотка явно несимметрична.

Последнее при трехъярусном исполнении не может быть полностью устранено при числах пар полюсов, не кратных трем. В лучшем случае можно поступить так: на различных парах полюсных делений первую и третью фазы попеременно располагать в самом наружном и самом внутреннем ярусах, в то время как вторую фазу неизменно оставлять в среднем. Это более полно достигает цели при четных числах пар полюсов, чем при нечетных, но радикального решения все же не дает.

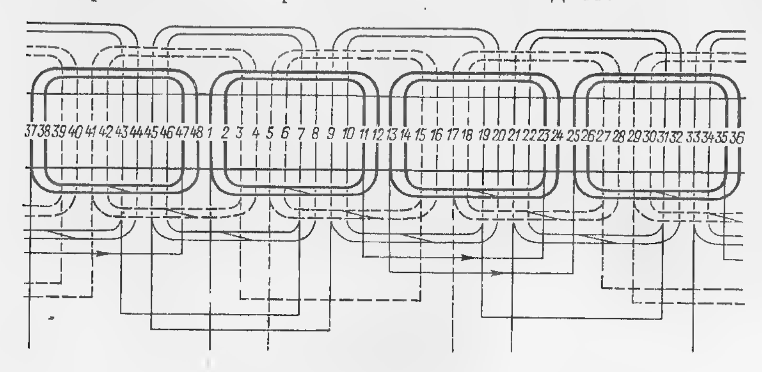


Рис. 2.10. Обмотка трехфазного тока с лобовыми частями в трех ярусах вразвалку

Модификация вразвалку при трехъярусном исполнении возможна, но при ней разъем без нарушения обмотки применить уже нельзя. Получающаяся непрерывность зоны лобовых частей приводит к тому, что лобовые части каждой фазы располагаются только в каком-либо одном ярусе, как показано на рис. 2.10,

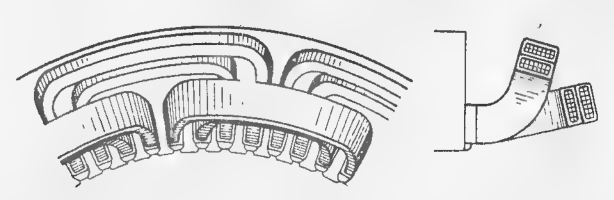


Рис. 2.11. Внешний вид обмотки трехфазного тока с лобовыми частями в двух ярусах

и здесь это уже неисправимо. В прошлом такая модификация находила широкое применение для обмоток статоров крупных машин, но в настоящее время если и встречается, то главным образом в двухполюсных машинах небольшой мощности. При нечетных числах пазов на полюс и фазу подобная модификация в принципе возможна, но неудобна и практически не применяется.

На рис. 2.11 представлен типичный внешний вид обмотки трехфазного тока с двухъярусными лобовыми частями: один ярус имеет

почти не отогнутые лобовые части, в то время как у другого они резко отогнуты по направлению к сердечнику якоря, пропуская под собой первый ярус.

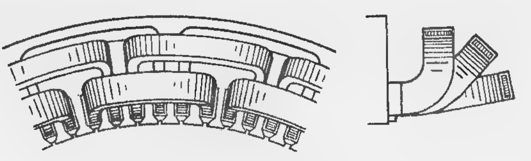


Рис. 2.12. Внешний вид обмотки трехфазного тока с лобовыми частями в трех ярусах

На рис. 2.12 показана модификация обмотки трехфазного тока с сосредоточенными лобовыми частями в трехъярусном исполнении. Все три яруса после выхода сторон секций из пазов отогнуты на различные углы и расположены на конических поверхностях. Такая форма достаточно типична при модификации вразвалку. Напротив, при сосредоточенных секциях встречается расположение лобовых частей в трех плоскостях, что и дало основание применять термин «трехплоскостная обмотка». Такая форма

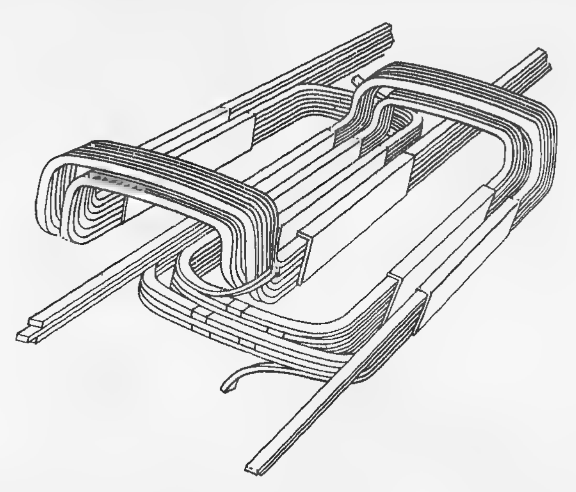


Рис. 2.13. П-образные разрезные секции и образование их лобовых частей

находила широкое применение для машин с малыми числами пар полюсов, так как облегчала крепление лобовых частей, имеющее существенное значение для таких машин.

Все эти формы обмоток в настоящее время еще встречаются при изготовлении машин, главным образом в случаях, когда применение современных форм, описываемых в следующих параграфах, почему-либо затруднительно или нецелесообразно; их можно встречать в машинах старого изготовления, особенно относительно больших мощностей. При этом попадаются машины более

или менее значительной мощности с полузакрытыми или полностью закрытыми пазами, в которые заложить обмотку можно лишь способами прошивания или разрезных секций, упомянутыми в первой главе. Второй из них имеет то преимущество, что допускает изготовление секций из проводника значительно большего сечения, чем первый, причем изоляция этого проводника не подвергается опасности повреждения при многократном протягивании через пазы. Этот способ пригоден и при трех, и особенно при двух ярусах; процесс образования лобовых частей в последнем случае показан на рис. 2.13.

2.5. ОДНОСЛОЙНЫЕ РАВНОСЕКЦИОННЫЕ ОБМОТКИ МНОГОФАЗНОГО ТОКА

Радикальным средством симметрирования фаз является применение равносекционных обмоток. Как и для обмоток однофазного тока, здесь можно различить три основные модификации: с сосредоточенными лобовыми частями, просто вразвалку и вразвалку с чередующимися пазами групп; но помимо этого в каждой из них существуют разновидности, многие из которых выполнимы не при всяких условиях.

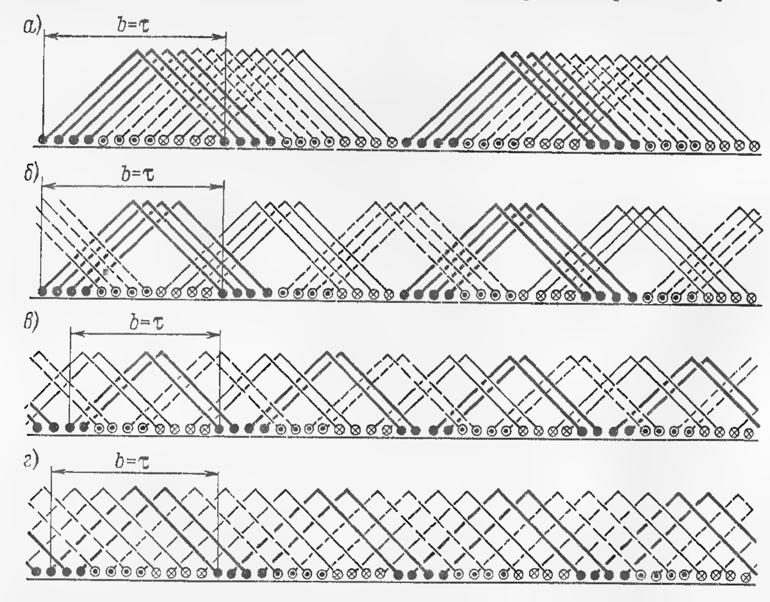


Рис. 2.14. Равносекционная обмотка трехфазного тока: *а* — с сосредоточенными лобовыми частями, с разъемом сердечника; *б* — то же, без разъема сердечника; *в* — с лобовыми частями вразвалку; *г* — с чередующимися секциями

На рис. 2.14, *а* представлена равносекционная обмотка трехфазного тока с сосредоточенными лобовыми частями, аналогичная обмотке на рис. 2.17; полная симметрия фаз здесь еще не может считаться достигнутой, потому что лобовые части групп различных фаз лежат по-разному по отношению друг к другу, вследствие чего неодинаково их сцепление с потоками рассеяния лобовых частей в целом. Тем не менее такая обмотка имеет преимущество перед концентрической не только в том, что вся изготовляется на одном шаблоне, но еще и в том, что в ней крепления лобовых частей получаются более единообразными. При всем этом она в полной мере сохраняет возможность разделения сердечника на части и находила частое применение в четырехполюсных турбогенераторах. Она одинаково выполнима при любых целых числах пазов на полюс и фазу.

Однако возможна модификация, уже не допускающая подразделение сердечника, но зато вполне симметричная, показанная на рис. 2.14, *б*; дополнительным достоинством ее следует считать то, что промежутки, образующиеся между лобовыми частями разных фаз, могут быть использованы для развитой системы креплений. И эта модификация выполнима при любом числе пазов на полюс и фазу и пригодна для двухполюсных машин; предыдущая давала бы в этом случае одностороннее размещение лобовых частей.

Подобно обмоткам однофазного тока, модификация вразвалку возможна только при четных числах пазов на полюс и фазу, потому что при нечетных не удается выполнить всю обмотку секциями одинаковой ширины. На рис. 2.14, *в* представлена такая обмотка. Ширина секций здесь меньше, чем в схемах на рис. 2.14, *а* и *б*; там секции имели ширину, равную полюсному делению, здесь же — только 5/6 = 0,833 полюсного деления, а для обмоток двухфазного тока она понижается до 3/4 = 0,75 полюсного деления; эти доли не зависят от числа пазов на полюс и фазу.

Таким образом, модификация вразвалку при том же распределении по пазам позволяет уменьшить вылет обмотки, расход материалов и пространство, занимаемое лобовыми частями, а заодно несколько ограничить индуктивное сопротивление обмотки.

Логическим завершением модификаций обмотки вразвалку является чередование секций с отгибом лобовых частей в разные стороны, т. е. отход от различимых по внешнему виду групп секций.

Схема такой обмотки с тем же $q = 4$ дана на рис. 2.14, *г*. На первый взгляд она не представляет особых преимуществ по сравнению со схемой на рис. 2.14, *в*, потому что ширина секций в ней только на одно зубцовое деление меньше полюсного деления; но на самом деле уже в таком виде она обладает тем достоинством, что лобовые части всех секций находятся на одинаковых расстояниях друг от друга, образуя однородную решетку. Это позволяет уменьшить их вылет или, оставляя последний неизменным, улучшить охлаждение. Следует отметить, что такая модификация равным образом пригодна и при нечетных числах пазов на полюс

и фазу, только в этом случае ширина секций остается равной полюсному делению. В учебной литературе такую обмотку называют обычно «цепной».

Здесь нужно указать на важное обстоятельство: если, например, левые стороны всех секций лежат в пазах с *нечетными* номерами, то правые попадают непременно в пазы с *четными* номерами. Таким образом, ширина секций, выраженная числом охватываемых ими зубцовых делений, должна быть *нечетным* числом, равным числу пазов на полюс при нечетных q и на единицу меньшим числа пазов на плюс при четных. Применяя терминологию, принятую для обмоток якорей машин постоянного тока, эту ширину, выраженную в зубцовых делениях, можно назвать шагом обмотки по пазам y или просто *шагом*, а шаг обмотки, равный числу пазов на полюс, следует назвать *диаметральным*.

Нет препятствий к тому, чтобы поднять из пазов, например с четными номерами, правые стороны всех секций и переложить их в пазы с четными же номерами, уменьшив при этом шаг обмотки до нечетного числа, меньшего, чем предыдущее; это принято называть *укорочением шага* обмотки. На рис. 2.15 представлены результаты трех укорочений шага обмотки, выполненной по рис. 2.14, *г*, которому последовательно приданы значения $y = 9$, 7 и 5. Распределение фаз по пазам каждый раз получается иным; сначала еще остается некоторое число соседних пазов, занятых одной и той же фазой, но затем между всеми пазами данной фазы появляются пазы, занятые другими фазами. Однако всегда можно провести такие оси, по отношению к которым распределение данной фазы по пазам симметрично; для первой фазы они нанесены условными штриховыми линиями.

На рис. 2.16 показана такая же операция, произведенная над обмоткой с нечетным числом пазов на полюс и фазу $q = 3$, шаг которой от первоначального значения $y = 9$ последовательно укорочен до значений $y = 7$ и 5. При этом распределение фаз по пазам перестает быть симметричным относительно какой-либо оси.

Рис. 2.15. Укорочение шага равносекционной обмотки трехфазного тока при четном числе пазов на полюс и фазу



Рис. 2.16. Укорочение шага равносекционной обмотки трехфазного тока при нечетном числе пазов на полюс и фазу

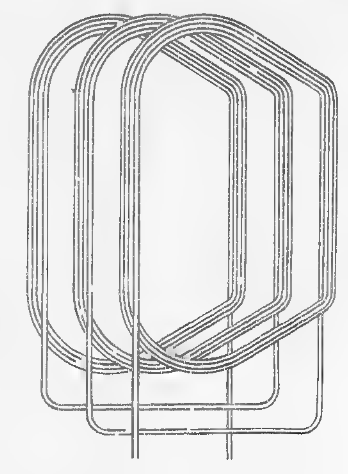


Рис. 2.17. Секция проволочной всыпной обмотки

Укорочение шага отражается на электрических и магнитных свойствах обмотки, причем при нечетном числе пазов на полюс и фазу обмотка должна приобретать дополнительно некоторые новые свойства, не наблюдавшиеся ни в одной из ранее рассмотренных модификаций.

Оставляя пока в стороне эти свойства, можно отметить, что укорочение шага имеет первым результатом уменьшение вылета лобовых частей; это должно давать некоторую экономию материалов и понижать индуктивное сопротивление обмотки. На самом деле все обстоит более сложно: укорочение шага предпринимается главным образом именно ради возможности того или иного изменения электрических и магнитных качеств (если не считать, что более узкие секции в общем легче укладывать в пазы по сравнению с более широкими). Благодаря этому однослойные обмотки трехфазного тока с укороченным шагом получили довольно широкое распространение, не прекращающееся и по настоящее время, причем они находят применение в машинах самой различной мощности и при любых числах пар полюсов.

Очень существенным недостатком равносекционных однослойных обмоток является сложность формы лобовых частей, вызываемая тем, что непосредственно по выходе из паза каждая секция должна пропустить мимо себя лобовые части других секций. Это не только затрудняет изготовление обмотки, но и осложняет крепление лобовых частей, особенно тогда, когда оно требуется очень надежным, т. е. в машинах с большими токами. Формы лобовых частей таких обмоток чрезвычайно разнообразны, и не представляется возможным дать их исчерпывающее описание.

Секции проволочных всыпных обмоток изготовляются на шаблонах, имеющих форму трапеции с закругленными углами, как показано на рис. 2.17, и лобовые части отформовываются вручную при укладке обмотки в пазы, в результате чего имеют вид витого жгута кольцеобразной формы с не очень правильными очертаниями; пример внешнего вида жестких секций, вполне отформованных предварительно, дан на рис. 2.18. Значительное упрощение формы лобовых частей может быть достигнуто в том случае, когда изготовление обмотки производится полусекциями, соеди-

ненными после укладки, если лобовые части отгибаются при выходе из пазов на угол 90° или близкий к нему по направлению к сердечнику, так что располагаются в плоскостях, параллельных торцам сердечника. Тогда достаточно, чтобы левые и правые полусекции отличались друг от друга лишь длиной прямолинейных участков непосредственно при выходе из пазов, как показано на рис. 1.37; однако это возможно только в машинах с малыми числами пар полюсов, обладающих большой высотой сердечника, так как в противном случае в машине нет места для такого размещения лобовых частей. Но при малых числах пар полюсов, особенно при $p = 1$, укладка цельных секций в пазы чрезвычайно затрудняется даже при укороченном шаге; поэтому приходится прибегать к разрезным секциям не только тогда, когда

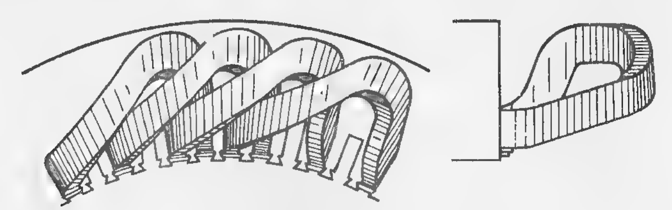


Рис. 2.18. Внешний вид равносекционной обмотки из жестких секций

они одновитковые, но и при нескольких витках. В этом случае каждая полусекция заготавливается в виде пучка соответствующего числа проводников с общей корпусной изоляцией и нужным образом отформованными лобовыми частями; после укладки таких полусекций в пазы они соединяются в секции пайкой отдельных проводников в заданном порядке, и эти пайки изолируются самостоятельно, образуя так называемую распушевку.

2.6. ДВУХСЛОЙНЫЕ ПЕТЛЕВЫЕ ОБМОТКИ

Сложность формы лобовых частей однослойных равносекционных обмоток, сильно затрудняющая их изготовление (особенно, когда это касается обмоток на большие токи, т. е. в основном для средних и крупных машин), а также недостаточная удовлетворительность их электрических и магнитных качеств заставляют изыскивать такие схемы обмоток, которые обладали бы всеми достоинствами этих обмоток, но по возможности не имели бы их недостатков.

Этим требованиям в наилучшей степени удовлетворяют двухслойные обмотки, полученные из обмоток якорей машин постоянного тока, но значительно видоизменившиеся по отношению к ним. Как и там, здесь существует подразделение на две основные разновидности — *петлевые* и *волновые* обмотки. Каждая из них имеет свои области применения, мало перекрывающие друг друга; в частности, петлевые обмотки применительно к статорам синхронных

и асинхронных машин всех мощностей, кроме гидрогенераторов, в настоящее время почти полностью вытеснили все другие виды.

Как и в обмотках якорей постоянного тока, каждая секция двухслойной обмотки укладывается одной стороной в нижнюю часть паза, а другой — в верхнюю часть другого паза, отстоящего от первого на шаг обмотки y. В отличие от однослойных равносекционных обмоток, на значение шага двухслойных обмоток с точки зрения их выполнимости не накладывается никаких ограничений — он может выражаться как нечетным числом, так и четным;

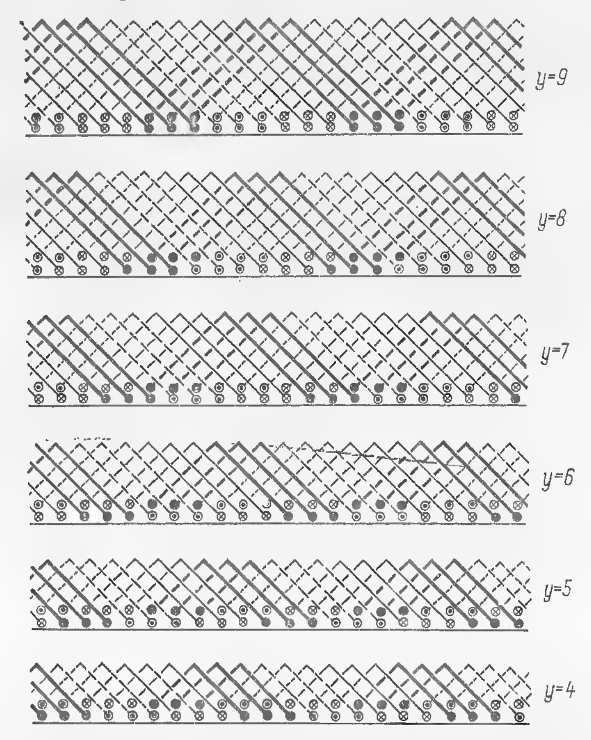


Рис. 2.19. Укорочение шага двухслойной обмотки трехфазного тока

поэтому нет препятствий к тому, чтобы этот шаг мог быть выбран по соображениям получения электрических и электромагнитных качеств, наиболее подходящих к данному случаю.

Пока речь идет о петлевых обмотках, для них не применяются понятия о частичных шагах, как, например, для обмоток постоянного тока; во всех случаях шаг обмотки y определяется по лобовым частям со стороны, противоположной выводам секций, так как именно им определяются свойства обмотки.

На рис. 2.19 показано, что происходит с обмоткой по мере укорочения шага. При диаметральном шаге, равном числу пазов на полюс, во всех пазах находятся стороны секций, принадле-

жащих только одной какой-нибудь фазе, причем такие пазы расположены рядом. При первом же укорочении шага на одно зубцовое деление появляются пазы, в которых лежат стороны секций разных фаз, но между ними еще продолжают оставаться пазы, занятые только данной фазой; при дальнейшем укорочении шага число последних уменьшается до тех пор, пока шаг не станет равным разности между числом пазов на полюс и числом пазов на полюс и фазу. Для обмотки трехфазного тока это произойдет тогда, когда шаг станет равным 2/3 числа пазов на полюс, а для обмотки двухфазного тока — когда он станет равным его половине. При этом уже не остается пазов, занятых сторонами секций только одной какой-либо фазы. Дальнейшее укорочение шага обмоток трехфазного тока приводит к тому, что когда шаг становится меньше 1/3 числа пазов на полюс, то снова появляются пазы, содержащие стороны секций одной фазы, но противоположно направленные, следовательно, взаимно компенсирующие свое действие; очевидно, что такое укорочение становится бессмысленным. Для обмотки двухфазного тока подобная картина начинается уже при укорочении шага до значения, меньшего половины числа пазов на полюс.

Таким образом, укорочение шага имеет определенный предел, ниже которого спускаться не следует; фактически же применяемые укорочения, за исключением редких специальных случаев, далеко не доходят до этого предела. Необходимо отметить, что во всех случаях распределение каждой фазы по пазам для всех фаз одинаково и остается симметричным по отношению к некоторой оси, если не считать, какие положения занимают в пазах стороны секций — в верхней или в нижней половине; в большинстве случаев это не отражается на общих свойствах обмотки, тем более когда таких сторон поровну или даже примерно поровну, как это обычно и бывает.

Вместо укорочения шага иногда приходится производить его *удлинение*, т. е. придавать ему значения, превышающие число пазов на полюс, как это показано на рис. 2.20. Здесь повторяются все те же явления: сначала появляются пазы, содержащие стороны секций разных фаз, их число постепенно возрастает, пока не окажется, что больше не осталось пазов со сторонами секций одной фазы. Для обмоток трехфазного тока это наступает при значении шага, равном 4/3 числа пазов на полюс, а для обмоток двухфазного тока — при 3/2 этого числа. Дальнейшее удлинение шага приводит к появлению пазов, занятых сторонами секций одной и той же фазы, но включенных в противоположных направлениях. Все картины распределения секций фаз по пазам повторяются в том же порядке, как и при укорочении шага, с той лишь разницей, что положения сторон секций в верхних или нижних половинах пазов обмениваются местами. По этой причине при удлинении шага повторяются все электрические и электромагнитные свойства обмоток, поскольку они касаются активной зоны;

но явления в лобовых частях принимают характер, ухудшающий качества обмотки. Поэтому удлинение шага применяется только в отдельных частных случаях, которым уделено внимание в главе седьмой.

В процессе развития электромашиностроения формы лобовых частей равносекционных обмоток, в первую очередь двухслойных, претерпевали много изменений, но в настоящее время они вполне установились. Для проволочных всыпных обмоток изготовление секций производится на шаблонах, подобных применяемым для однослойных равносекционных обмоток (см. рис. 2.17); обычно сразу наматывается число секций, равное числу пазов на полюс и фазу. Лобовые части и здесь отформовываются уже после укладки обмотки в пазы и по внешнему виду мало отличаются от лобовых частей однослойной всыпной обмотки.

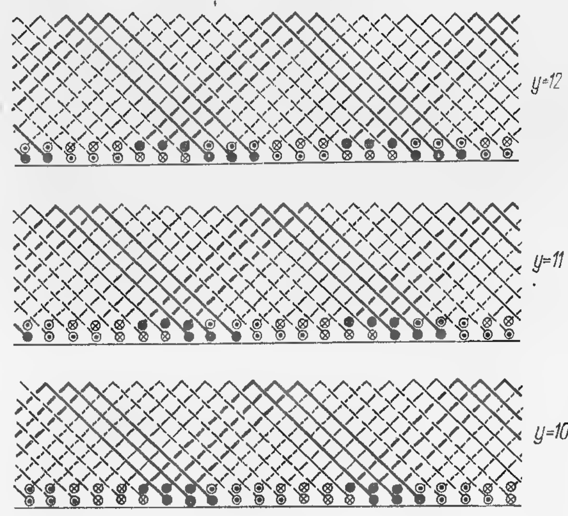


Рис. 2.20. Удлинение шага двухслойной обмотки трехфазного тока

Одним из технологических недостатков равносекционных обмоток, в том числе и двухслойных, является затрудненность окончания укладки обмотки в пазы. В начале этой операции число секций, равное шагу обмотки, укладывается в пазы только одной стороной, занимающей нижнюю половину паза, а противоположная сторона остается неуложенной и несколько отогнутой внутрь расточки статора (рис. 2.21). Когда укладка подходит к концу, то под эти отогнутые стороны нужно подвести те стороны последних укладываемых секций, которые должны занять нижние половины пазов; только после этого отогнутые стороны могут быть опущены в пазы и занять их верхние половины, чем и заканчивается наложение обмотки.

При мягких проволочных всыпных секциях их отгибание само по себе не представляет особой трудности, но подведение под них

сторон последних укладываемых секций затруднено недостатком места внутри обматываемого статора; в результате укладка последних секций занимает немногим меньше времени, чем всей остальной части обмотки. Для устранения этого затруднения применяется такой прием: первые секции на протяжении их шага укладываются на дно пазов обеими сторонами, как показано на рис. 2.22, и только после этого укладка продолжается в нормальном порядке, а последние укладываемые секции ложатся обеими

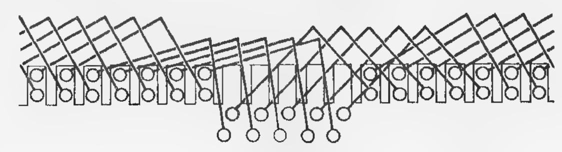
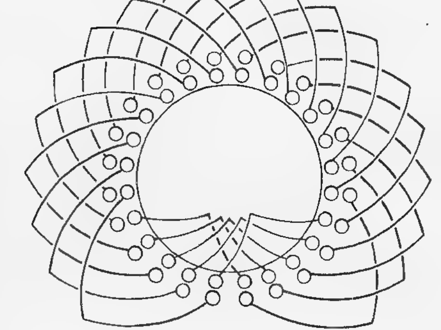


Рис. 2.21. Окончание укладки секций двухслойной обмотки

сторонами в верхние части пазов. Это создает некоторую несимметричность индуктивных сопротивлений фаз из-за неодинаковости положений сторон их секций в пазах; однако она не отражается заметным образом на работе машин и потому вполне может быть допущена, хотя внешний вид обмотки при этом несколько ухудшается.

При жестких секциях такой прием не может быть применен и отгибание секций на протяжении шага неизбежно; оно особенно затруднено в машинах с малыми числами пар полюсов, что вынуждает применять в них либо очень сильно укороченный шаг, либо разрезные секции.

Наиболее универсальна форма жестких многовитковых секций обмоток машин средней и крупной мощности, представленная на рис. 2.23; помимо размеров, которые могут изменяться в очень широких пределах, различие ограничивается лишь большей или меньшей массивностью выводов в зависимости от числа витков в секции. Эта форма заслуживает подробного описания. Прямолинейные активные стороны секции заканчиваются прямолинейными же участками лобовых частей по обе стороны сердечника, длина которых зависит не только от размеров поперечного сечения секции, но и от номинального напряжения машины и от способа наложения изоляции секции. Изгибом относительно небольшого радиуса прямолинейные участки переходят в криволинейные,



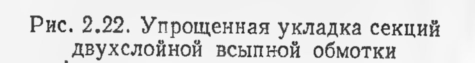


Рис. 2.22. Упрощенная укладка секций двухслойной всыпной обмотки

изогнутые по линиям двоякой кривизны с таким расчетом, чтобы расстояния между лобовыми частями соседних секций после укладки были примерно неизменными по всей длине этих участков. При этом криволинейные участки должны расположиться на конических поверхностях с довольно малым углом

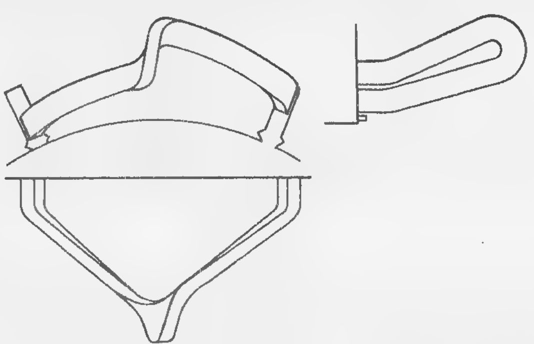


Рис. 2.23. Жесткая многовитковая секция двухслойной обмотки

при вершине, меньшим у верхнего слоя и бо́льшим у нижнего. Сойдясь в наиболее удаленном от сердечника месте, криволинейные участки смыкаются коротким переходным участком, изогнутым по винтовой линии, называемым *головкой* секции; выводы секции располагаются у места перехода криволинейных участков в головку.

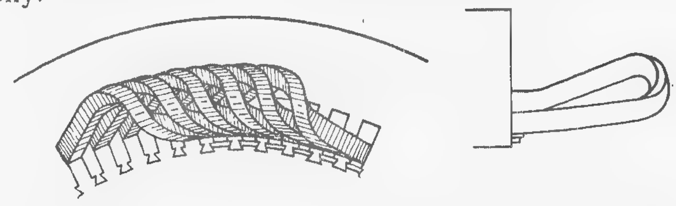


Рис. 2.24. Внешний вид двухслойной обмотки из жестких секций

На рис. 2.24 представлена типичная двухслойная обмотка из жестких секций машины средней мощности со стороны, противоположной соединениям; лобовые части образуют ровную корзинку, в которой нельзя различить, где кончается одна фаза и начинается другая. Эта корзинка может хорошо продуваться вентиляционным воздухом, что обеспечивает ее охлаждение.

При изготовлении одновитковых секций полусекциями последние в целом повторяют описанную форму с той разницей, что головка образуется пропаиваемым хомутиком, примеры чего даны на рис. 2.25 и 2.26. При непосредственном охлаждении обмоток роль хомутиков выполняют наконечники, одновременно служащие для подвода и отвода охлаждающей жидкости или газа; их формы могут быть очень разнообразны.

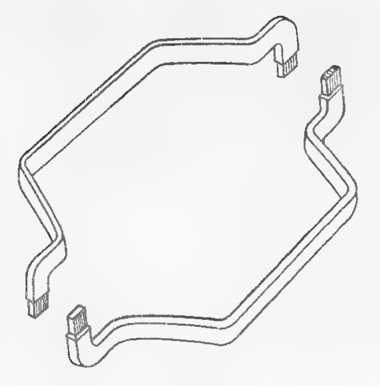


Рис. 2.25. Полусекции верхнего и нижнего слоев стержневой обмотки

Соединение стержней в хомутиках производится пайкой различными припоями, из которых наиболее целесообразным является твердый припой с небольшим содержанием серебра типа ПСР-15: он хорошо заполняет пустоты, достаточно, но не чрезмерно тугоплавок и механически прочен. После этого головки изолируются: при относительно небольших размерах — наложением слоев такой же ленты, которой изолированы лобовые части, а большие головки, особенно когда хомутики одновременно служат для подвода охлаждающей среды в обмотку, — специально

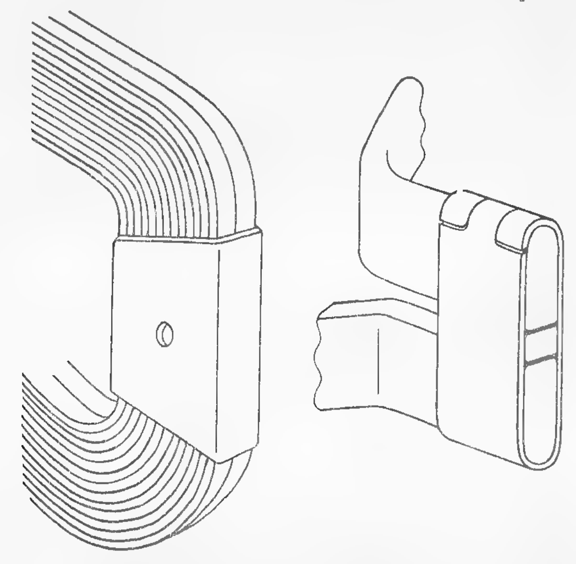


Рис. 2.26. Хомутики для соединения стержней обмотки: *а* — статора; *б* — ротора с фазной обмоткой

отформованными коробками из пластиката с наполнением стекловолокном, внутренняя полость которых затем заливается достаточно жидкотекучей термореактивной массой с неорганическим наполнителем, например мелкодисперсным кварцем (маршаллитом).

Пайка головок стержней небольших сечений производится оловянистым припоем, например половником, и иногда вовсе без применения хомутиков — каждая пара элементарных провод-

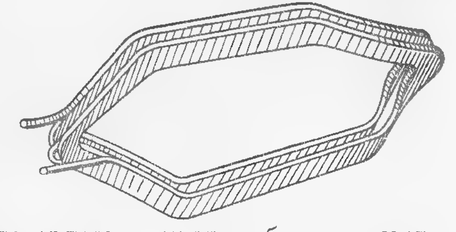


Рис. 2.27. Секция обмотки для укладки в полуоткрытые пазы

ников запаивается внахлест; однако такой способ хотя и дает достаточно надежное скрепление, но излишне трудоемок.

Особую разновидность представляют секции обмоток, укладываемые в полуоткрытые пазы; такие секции изготовляются двойными, как показано на рис. 2.27. Это допускает поочередную укладку их сторон через относительно узкое отверстие паза,

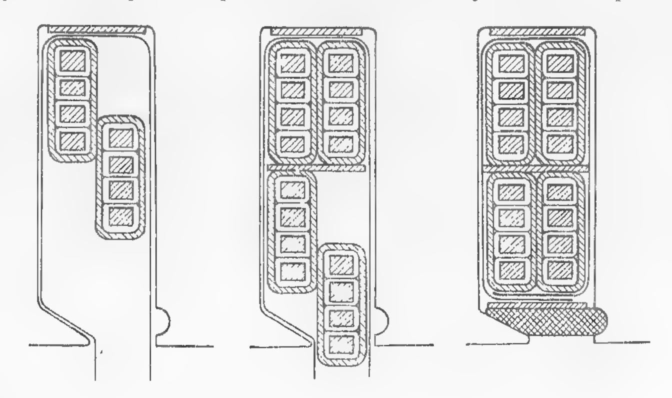


Рис. 2.28. Порядок укладки секций в полуоткрытые пазы

причем сначала укладывается та сторона, которая потом должна находиться под выступом зубца, затем она передвигается на свое место и в освободившееся пространство укладывается вторая сторона, как показано на рис. 2.28.

2.7. РАСПОЛОЖЕНИЕ ВЫВОДОВ ОБМОТОК

В § 2.1 было установлено, что начало первой фазы обмотки многофазного тока находится в пазу с номером *1*, причем если обмотка имеет несколько слоев — то в самом нижнем из них; после этого места расположения начал прочих фаз становятся уже не произвольными, а зависящими определенным образом от начала первой фазы. Что касается концов фаз, то при последовательном соединении всех секций каждой фазы их положения получаются автоматически — на выходе из последней секции. Такое расположение начал и концов фаз удобно для изучения электрических и электромагнитных свойств обмоток и потому принято на всех схемах в этой книге. В частности, если число пар полюсов не кратно числу фаз, удобно распределять начала фаз равномерно по окружности — это придает схемам особую ясность.

Однако при реальном осуществлении обмоток такое расположение выводов может оказаться (и оказывается в весьма многих случаях) вовсе не самым целесообразным: конструктивно гораздо удобнее, чтобы начала и концы фаз были сосредоточены на небольшой части окружности машины, именно там, куда предполагается подводить внешние коммуникации — провода, кабели или шины.

Если при последовательном соединении всех секций фазы соединить между собой начало и конец данной фазы, выбранные согласно принятым здесь правилам, то фаза превратится в замкнутое целое; любое соединение между секциями может быть после этого нарушено и образовавшиеся таким образом выводы приняты за начало и конец данной фазы. Разумеется, предпочтительно использовать для этого соединения между группами секций, а не между отдельными секциями внутри группы.

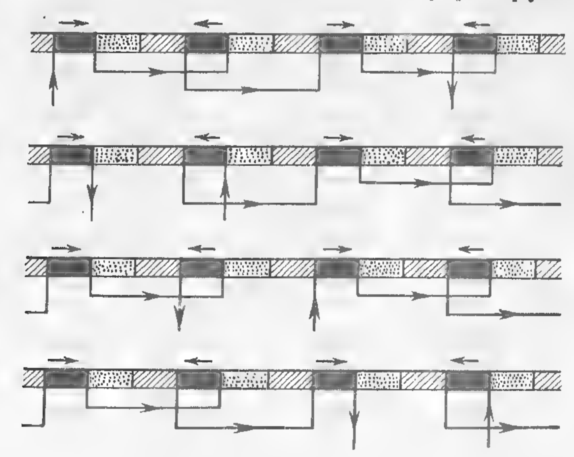


Рис. 2.29. Выбор места расположения выводов

Число групп секций в фазе, а следовательно, и число соединений между группами зависят от числа пар полюсов, типа обмотки и принятой модификации. В частности, для наиболее распространенных типов обмоток — двухслойных и однослойных с чередующимися секциями — число групп секций равно числу полюсов, следовательно, таково же число мест возможного расположения выводов каждой фазы, из которого остается выбрать наиболее подходящее для данного случая (рис. 2.29). В модификациях с сосредоточенным расположением секций, наиболее распространенным представителем которых являются однослойные двухъярусные обмотки с концентрическими секциями, число таких мест вдвое меньше — оно равно числу пар полюсов.

Действующие стандарты требуют, чтобы маркировка выводов обмоток совпадала с действительным чередованием фаз при номинальном направлении вращения машины; но размещение выводов ими не оговаривается, так что последние могут чередоваться в любом порядке, и это облегчает выбор наиболее удобного расположения.

В обмотках трехфазного тока всех рассмотренных типов активные стороны секций в пазах всегда чередуются в следующем порядке, если смотреть по направлению вращения для обмоток на неподвижной части машины: за первой фазой следует третья, за ней вторая, снова первая и т. д. Очевидно, в таком же порядке чередуются и головки лобовых частей обмоток всех типов, кроме однослойных с сосредоточенными лобовыми частями; это должно быть принято во внимание при отыскании мест расположения выводов.

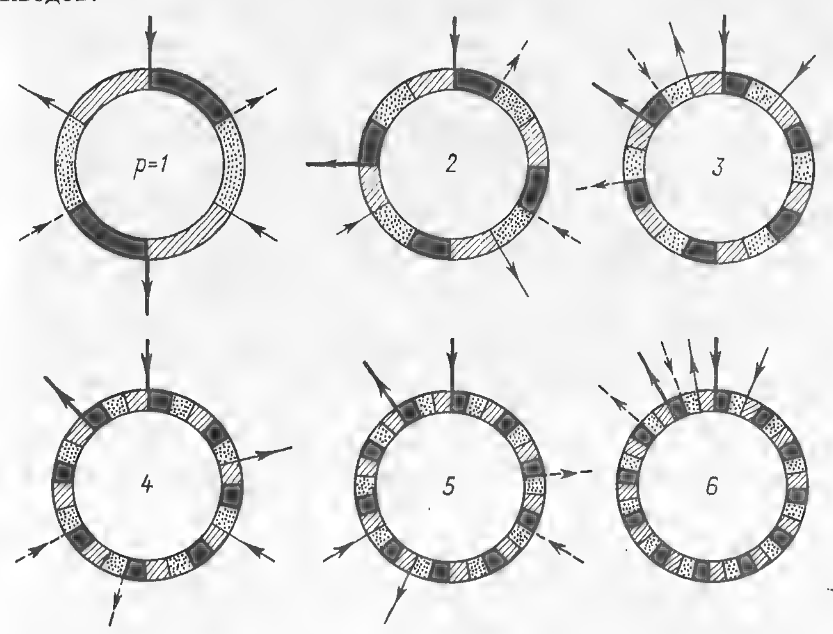


Рис. 2.30. Чередование выводов при различных числах пар полюсов

На рис. 2.30 построены топографические схемы обмоток с различными числами пар полюсов от $p = 1$ до $p = 6$, на которых сделана попытка равномерного распределения выводов по окружности; такие построения можно продолжить для любых чисел пар полюсов. Сразу становится видно, что при $p = 1,\ 4,\ 7 \ldots$, т. е. для чисел пар полюсов, определяемых формулой $p = 3i + 1$, выводы чередуются по окружности в направлении часовой стрелки, а при $p = 2,\ 5,\ 8,\ \ldots$, т. е. для чисел пар полюсов $p = 3i - 1$, чередование их обратно; что же касается обмоток с числами пар полюсов, кратных трем, то распределить их выводы равномерно по окружности не удается, потому что в равноотстоящих местах оказывается все время одна и та же фаза, и приходится прибегать к какому-нибудь другому расположению.

Это обстоятельство имеет важное практическое значение. Так, например, в обмотках с переключением чисел пар полюсов в отношении 1 : 2, представляющих наиболее распространенную разновидность обмоток этого вида, рассматриваемых в главе седьмой, при каждом переключении чередование фаз должно быть изменено на обратное, так как в противном случае изменится направление вращения машины. Если переключение числа пар полюсов производится на ходу, то это изменение направления вращения может привести к аварии.

2.8. ОБМОТКИ С НЕОДИНАКОВЫМИ ЧИСЛАМИ ВИТКОВ В СЕКЦИЯХ

При расчете электрических машин, особенно в стесненных условиях, когда, например, и основные размеры машины — диаметр и осевая длина, и число пазов с их размерами заданы, нередко приходится сталкиваться с таким положением, что некоторое число витков в секциях является слишком большим и при нем не удается обеспечить достаточное сечение проводников обмотки якоря, а если его уменьшить всего лишь на единицу, то чрезмерно возрастут индукции во всех участках магнитной цепи и т. п. В таких случаях считается допустимым делать секции двух видов — с числами витков, различающимися на единицу, между которыми заключено оптимальное дробное числа витков. Понятно, что это касается главным образом случаев, когда числа витков небольшие; но в каждый паз должны укладываться стороны одной секции с бóльшим и одной секции с меньшим числами витков, так что общее число проводников во всех пазах будет одинаковым.

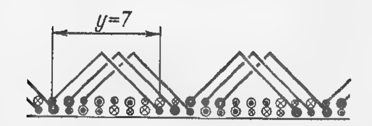


Рис. 2.31. Обмотка с неодинаковыми числами витков в секциях и чередованием секций через одну при нечетном числе пазов на полюс и фазу

Получаемые таким образом двухслойные обмотки отличаются от обычных некоторыми особенностями, которые необходимо учитывать; они определяются способом чередования в пазах секций с бóльшим и меньшим числами витков: через одну секцию или через две. Оба способа могут быть применены и при четных, и при нечетных числах пазов на полюс и фазу, но дают различные результаты: в первом случае шаг секций может быть только нечетным, а во втором — только четным.

На рис. 2.31 представлен отрезок расположения секций с чередованием через одну при нечетном числе пазов на полюс и фазу $q = 3$. Стороны секций с бóльшим числом витков изображены кружками большего диаметра, чем стороны секций с меньшим числом витков; в действительности различие между секциями обоих видов может быть едва заметным. Шаг секций принят укороченным: $\beta = 7/9$, однако он мог бы быть диаметральным, так как и при диаметральном шаге в каждом пазу находились бы стороны секций с бóльшим и меньшим числами витков. Изображенные на рисунке две группы секций имеют неодинаковые общие числа витков; следовательно, их нельзя соединить параллельно, так что наибольшее возможное число параллельных ветвей здесь равно числу пар полюсов:

$$a_{\max} = p.$$

Далее на рис. 2.32 показан отрезок расположения секций с таким же чередованием при четном числе пазов на полюс и фазу

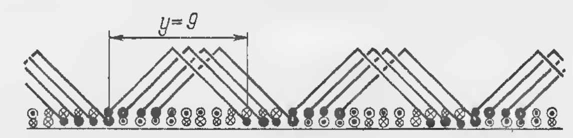


Рис. 2.32. Обмотка с неодинаковыми числами витков в секциях и чередованием секций через одну при четном числе пазов на полюс и фазу

$q = 4$. Особенностью здесь является то, что каждая группа секций несимметрична относительно своей оси, что должно некоторым образом отражаться на свойствах обмотки; однако только при самых малых числах витков в секциях влияние этой несимметричности будет заметным. В противоположность предыдущему случаю здесь все группы секций одинаковы, так что нет препятствий к их параллельному соединению; таким образом, наибольшее возможное число параллельных ветвей равно числу полюсов, как и в нормальной двухслойной обмотке: $a_{\max} = 2p$.

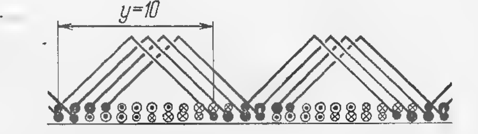


Рис. 2.33. Обмотка с чередованием секций через две при четном числе пазов на полюс и фазу

Группы секций станут вполне симметричными, если при $q = 4$ применить чередование секций через две, как на рис. 2.33; здесь шаг может приобретать только четные значения, не кратные четырем, как в данном случае $y = 10$. Одинаковость всех групп секций на данном рисунке позволяет иметь наибольшее число параллельных ветвей $a_{\max} = 2p$, как и в предыдущем случае; и здесь свойства обмотки несколько отличаются от нормальных, поскольку числа проводников каждой фазы в пазах могут иметь не два значения, находящихся в отношении 2 : 1, как в обычной обмотке, а три: меньшее, большее и их сумму. Можно было бы рассмотреть также случай четного числа пазов на полюс и фазу, не кратного четырем, при котором группы секций стали бы либо неодинаковыми по числам витков, либо несимметричными, но встретить такие числа практически очень маловероятно.

Таким образом, чередование секций через одну может быть рекомендовано при нечетных числах пазов на полюс и фазу, а через две — при четных, однако, например, при $q = 2$ последнее дает возможность иметь только диаметральный шаг, поскольку меньший четный шаг был бы кратен четырем, т. е. обмотка не может быть выполнена. Более сложные чередования нет надобности рассматривать.

Неодинаковые числа витков в секциях, а именно находящиеся в отношении 1 : 2, применяются в так называемых *полуторaслойных* (или же «двухслойно-однослойных») обмотках с целью облегчения механизации наложения обмотки; они возможны при всех числах пазов на полюс и фазу, начиная с $q = 3$. При них каждая группа секций состоит из одной секции с полным числом витков и $q - 2$ секций с половинным числом витков; эти секции

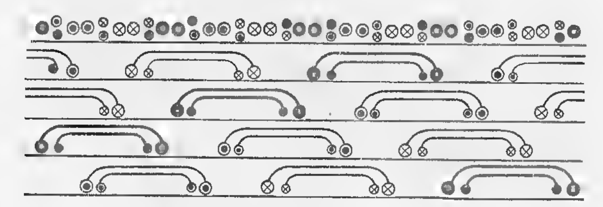


Рис. 2.34. Схема укладки полуторaслойной обмотки трехфазного тока

имеют форму концентрических с модификацией вразвалку, притом так, что в каждой группе наружной является секция с полным числом витков, а внутренними — секции с половинным числом. Укладка секций в пазы производится в четыре захода в порядке, представленном на рис. 2.34 для четырехполюсной обмотки с $q = 3$. Таким образом, в каждом пазу лежит либо сторона секции с полным числом витков, либо две стороны секций с половинным числом витков; в результате электрические свойства обмотки получаются такими же, как у двухслойной обмотки с шагом $y = 2q + 2$. Помимо возможности механизации такой укладки секций эта система дает некоторое уменьшение расхода обмоточного проводника, правда, очень незначительное; но объем пазов, занимаемых сторонами секций с полным числом витков, несколько недоиспользован вследствие отсутствия в них междуслойных прокладок; этим можно воспользоваться для добавления к этим секциям нескольких дополнительных витков, что не нарушит симметрии обмотки.

2.9. ОБМОТКИ ИНДУКТОРОВ

Обмотки явнополюсных индукторов обычно выполняются из вполне одинаковых катушек, по крайней мере по форме и по числу витков, и потому могут быть отнесены к равносекционным с одним обмотанным пазом на полюс; роль паза здесь играет меж-

дуполюсный промежуток. В каждом таком пазу лежат две активные стороны катушек с лобовыми частями вразвалку, но это не препятствует тому, чтобы рассматривать их как электрически одно целое. Не составляет различия и то обстоятельство, что при распространенном в настоящее время исполнении катушек из голой полосы, гнутой на высокое ребро, одна сторона каждой катушки имеет на один проводник больше, чем другая, как на рис. 2.35, и их выводы, которыми все они соединяются друг с другом, оказываются по разные стороны индуктора. В результате числа проводников в соседних междуполюсных промежутках отличаются поочередно на два, но при относительно больших числах витков в каждой катушке это несущественно.

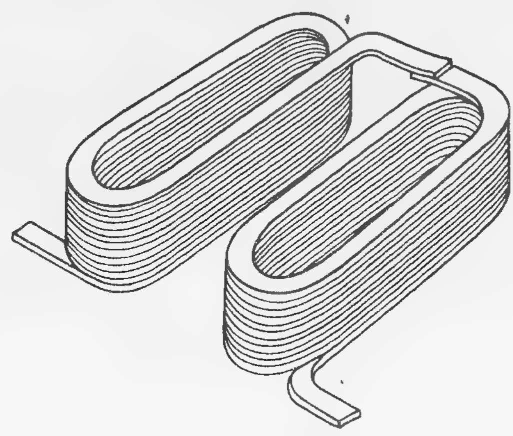


Рис. 2.35. Катушки явнополюсного индуктора, намотанные на высокое ребро

Изредка, главным образом в многополюсных индукторах машин повышенной частоты, применяется расположение катушек через один полюс, т. е., например, только на полюсах нечетной нумерации; в этом случае междуполюсные промежутки по форме становятся очень похожими на пазы, вплоть до того, что закрываются клиньями. Несмотря на то что при таком устройстве индуктора возникает явление униполярной индукции в вале, вращающемся в магнитных полях, создаваемых лобовыми частями катушек с одинаковыми направлениями тока, это исполнение иногда представляется единственно возможным по конструктивным соображениям.

В синхронных генераторах повышенной частоты, начиная примерно с 500 Гц, а иногда и менее, число полюсов становится слишком большим, а размеры их и промежутков между ними — слишком малыми для удовлетворительного размещения обмотки возбуждения даже через один полюс. В таких случаях ротор выполняется в виде зубчатого колеса без обмотки. Обмотка возбуждения располагается на статоре в пазах, помещенных между

пазами обмотки якоря, как это схематически показано на рис. 2.36, и по форме подобна отдельным секциям однослойной концентрической обмотки; каждый паз обычно содержит стороны двух секций. Такая обмотка создает в зазоре машины намагничивание с небольшим числом пар полюсов (в данном случае $p = 2$); индуктирование ЭДС в проводниках обмотки якоря происходит за счет местных пульсаций сопротивления магнитной цепи, а следовательно, и индукции при прохождении мимо каждой точки якоря то зубца ротора, то впадины между зубцами. Синхронные машины такого типа принято называть *индукторными*.

Другой разновидностью синхронных машин с обмоткой возбуждения на статоре являются машины с роторами так называемого *когтеобразного* типа. В своей первоначальной форме такой ротор имеет вид насаженного на вал цилиндра, по обеим сторонам которого приложены диски с когтеобразно выступающими полюсными наконечниками; диски установлены так, что наконечники одного приходятся на промежутки между наконечниками другого. На цилиндр насажена катушка, создающая намагничивание вдоль оси вала; магнитный поток замыкается через диски с их наконечниками, зазор и сердечник статора. Возбуждение подается через обычные контактные кольца; таким образом, в машине сохранился один из основных недостатков синхронной машины — скользящий контакт. Из-за технологических трудностей изготовления такая форма не нашла широкого применения.

В сравнительно недавние годы электромашиностроение снова вернулось к этой форме применительно к машинам небольших мощностей и преимущественно повышенной частоты, однако с устранением скользящего контакта. Это достигается тем, что на статоре устанавливается система, состоящая из двух полюсных наконечников цилиндрической формы, соединенных между собой несколькими магнитными перемычками достаточного сечения; обмотка возбуждения, большей частью в виде двух кольцеобразных катушек, помещается внутри образованной таким образом клетки. Здесь магнитный поток уже не замыкается через цилиндр на валу; диски с когтеобразными выступами могут

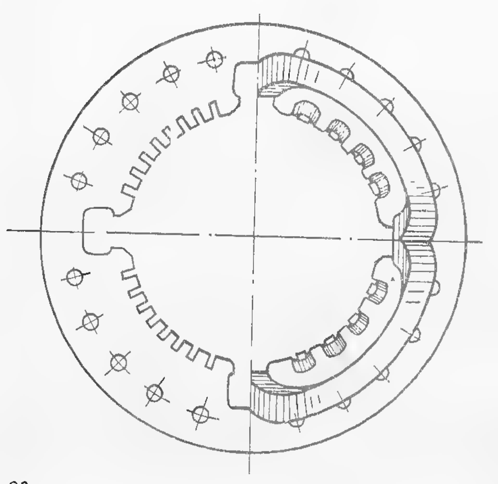


Рис. 2.36. Обмотка возбуждения машины индукторного типа

быть насажены на вал через немагнитные вставки, и этим в значительной степени устраняется продольное намагничивание вала, вызывающее в нем униполярную индукцию и порождающее подшипниковые токи.

Обмотки возбуждения неявнополюсных индукторов в подавляющем большинстве выполняются концентрическими секциями вразвалку, чем преследуется прежде всего уменьшение вылета лобовых частей, а также уравновешенность индуктора. Известны, однако, исполнения в виде нескольких равносекционных двухслойных обмоток, преимущественно с диаметральным шагом, заложенных друг над другом в общие пазы; такое исполнение предназначается главным образом для обмоток с непосредственным охлаждением дистиллятом, так как открывает прямой доступ для подвода дистиллята ко всем секциям. Известны также обмотки, у которых лобовые части со стороны подводов дистиллята выполняются как равносекционные, а с противоположной стороны — как концентрические; однако можно думать, что такое соединение двух различных исполнений делается главным образом из патентных соображений.

Турбогенераторы и синхронные турбодвигатели в своем большинстве имеют одну пару полюсов, значительно реже — две и исключительно редко — три, причем в настоящее время последние практически не встречаются и шестиполюсные машины выполняются только явнополюсными; во всех случаях число обмотанных пазов на полюс бывает относительно велико и возрастает с мощностью машины. Промежутки между обмотанными пазами либо оставляются без пазов, либо снабжаются относительно неглубокими пазами, закрытыми магнитными клиньями и служащими для охлаждения индуктора продуваемым через них газом, а в двухполюсных машинах — также для выравнивания моментов инерции сечения индуктора по двум взаимно перпендикулярным осям, одна из которых проходит через середины этих промежутков, а другая — через середины обмотанных участков. В отдельных случаях в такие пазы укладываются также стержни успокоительной обмотки.

Число обмотанных пазов на каждом полюсном делении принимается всегда только четным, потому что в противном случае возникла бы трудно устранимая неуравновешенность индуктора. При этом, как правило, пазы фрезеруются так, что делят окружность индуктора на целое четное число частей, называемое обычно *числом делений* индуктора. Отступление от этого в принципе возможно и иногда применяется, но вызывает некоторые затруднения при фрезеровании пазов, и его большей частью избегают. Участки индуктора, не имеющие пазов с обмоткой и выполняющие роль наконечников явновыраженных полюсов, называются *большими зубцами*; в случае если в них фрезеруются упомянутые выше пазы без обмотки, эти последние обычно располагаются по тем же делениям, что и обматываемые пазы.

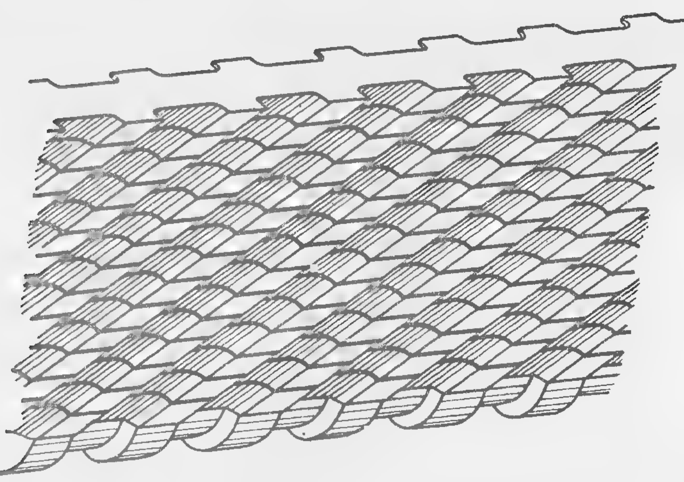
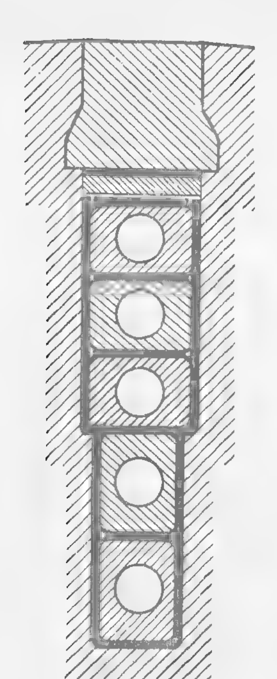


Рис. 2.37. Внутрипазовые каналы для непосредственного газового охлаждения обмотки неявнополюсного индуктора

В индукторах наиболее крупных машин нередко по одному или по два паза, ближайших к большим зубцам, выполняются меньшей глубины, чем прочие, и в них содержится меньше проводников; это делается с целью некоторого приближения формы кривой магнитодвижущей силы индуктора к синусоидальной.

При косвенном или непосредственном газовом охлаждении обмотки неявнополюсного индуктора число проводников в пазу обычно бывает довольно велико; внутрипазовые каналы для прохода газа при непосредственном газовом охлаждении либо образуются за счет выемок сечения проводников, как на рис. 1.18, либо фрезеруются в собранном комплекте проводников каждого паза, например подобно тому, как показано на рис. 2.37. Применяется также выполнение внутрипроводниковых наклонных каналов либо путем фрезерования специальным устройством, напоминающим по форме многоковшовый канавокопатель, либо с помощью выштамповывания щелевидных отверстий поочередно во всех проводниках на особом станке, передвигающем их точно на определенный шаг.



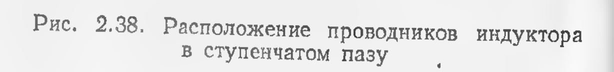


Рис. 2.38. Расположение проводников индуктора в ступенчатом пазу

При непосредственном жидкостном охлаждении необходимость во внутрипроводниковых каналах достаточного сечения ведет к тому, что число проводников в одном пазу ограничивается немногими единицами. Довольно характерным становится при этом различное расположение проводников одного и того же сечения в верхней и нижней частях пазов (рис. 2.38), для чего пазу придается ступенчатая форма, как на рис. 1.7, *д*.

В последнее время в некоторых специализированных видах синхронных машин стали находить применение обмотки так называемого *продольно-поперечного возбуждения*, являющиеся по своему конструктивному исполнению обмотками многофазного тока, питаемыми от независимых возбудительных устройств. Наиболее характерными являются агрегаты, предназначенные для связи между энергетическими системами с различной частотой и состоящие из двух синхронных машин; по крайней мере одна из них должна иметь неявнополюсный индуктор с продольно-поперечным возбуждением. Если в обмотку такого возбуждения подавать питание от источника многофазного тока с частотой, равной разности частот связываемых систем, то частота этой машины будет равна сумме или разности частоты другой машины и частоты возбуждения, что и позволит синхронизировать системы с различными частотами. Разумеется, эта разность должна быть невелика, так как индуктивное сопротивление обмотки возбуждения очень значительно.

Соединяемые таким способом системы могут и не различаться по частоте, но иметь некоторую разность фаз, препятствующую их соединению; эта разность также может быть выравнена при помощи такого же агрегата. Во всех таких случаях управление возбуждением должно производиться устройством на базе ЭВМ.

Продольно-поперечное возбуждение находит применение также для нагрузки синхронных машин при испытании на заводе-изготовителе; в этом случае управление им производится вручную самим ведущим испытание.

Для продольнопоперечного возбуждения в принципе пригодны любые многофазные системы, но практически может идти речь только о двух — двухфазной и трехфазной. Ниже, в главах третьей и четвертой, показано, что первая во всех отношениях уступает второй и этой последней должно быть отдано безусловное предпочтение. Здесь пока достаточно отметить, что в отдельные моменты работы машины ось магнитного поля машины становится в такое положение, когда поле должно создаваться только одной обмоткой возбуждения, если оно двухфазное, и тогда одна фаза должна быть способна обеспечить полное возбуждение машины; при трехфазной системе такого положения не может быть — в любом случае возбуждение создается по крайней мере двумя фазами.

При этом, что особенно важно, питание трехфазной системы возбуждения может производиться всего от двух независимых

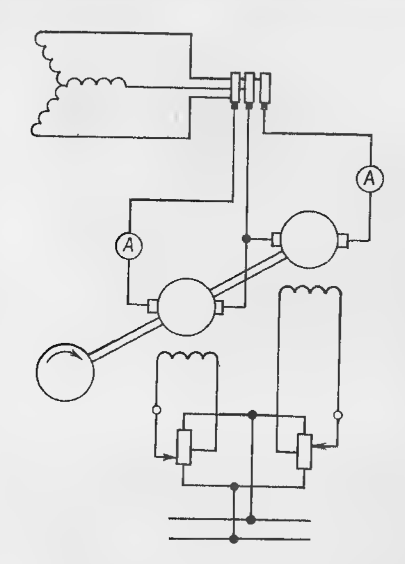


Рис. 2.39. Схема питания системы продольно-поперечного возбуждения

источников по схеме открытого треугольника, как показано на рис. 2.39; более того, попытки применения трех источников при любом их соединении приводят к большим затруднениям в отношении выравнивания их характеристик, что при двух источниках полностью отпадает.

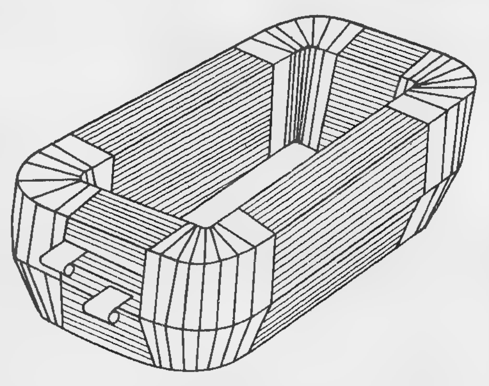
Рациональной формой исполнения обмотки продольно-поперечного возбуждения при любом числе ее фаз является двухслойная равносекционная; она позволяет избежать перекрещивания лобовых частей катушек концентрических обмоток, крайне трудно выполнимого для обмоток на вращающейся части, особенно при малом числе пар полюсов.

Несколько иное назначение имеет применение продольно-поперечного возбуждения для синхронных компенсаторов, которым в современных энергетических системах большой протяженности зачастую приходится работать в режимах не только недовозбуждения, но и отрицательного возбуждения, при котором повышается склонность машины к выпадению из синхронизма, хотя она и не несет никакой активной нагрузки. Для предотвращения такого выпадения в обмотку поперечного возбуждения подаются кратковременные импульсы, которые и удерживают машину от опрокидывания. В этих случаях обмотка поперечного возбуждения может быть гораздо меньших размеров, чем обмотка продольного; вопрос же о ее конструктивном исполнении и форме машины в целом здесь не может рассматриваться.

Обмотки возбуждения как явнополюсных, так и неявнополюсных машин изготовляются большей частью на гибочных станках целыми катушками; однако некоторые фирмы изготовляют катушки из отдельных витков, составляемых из прямолинейных отрезков шин при помощи пайки твердым припоем; это позволяет устранить деформацию сечения проводника при изгибании на высокое ребро и придает катушке очень точную форму.

Катушки обмотки возбуждения наиболее крупных машин постоянного тока зачастую изготовляются подобным же образом — из голой шины, изгибаемой на высокое ребро; однако для большинства этих машин характерно выполнение полюсных катушек из изолированного проводника прямоугольного или круглого сечения наподобие представленной на рис. 2.40. Иногда в целях улучшения охлаждения такие катушки разделяются на две или

Рис. 2.40. Катушка полюса машины постоянного тока



три части с достаточными промежутками для доступа охлаждающей среды, как показано на рис. 2.41.

Обмотки добавочных полюсов машин даже очень умеренной мощности изготовляются предпочтительно из голой шины, при более или менее значительных числах витков на полюс — гнутой на высокое ребро, причем вместо междувитковой изоляции применяются распорки из твердого изолирующего материала; это обеспечивает их хорошее охлаждение. Если же число витков на полюс исчисляется немногими единицами, то более удобным является выполнение их из проводника прямоугольного сечения, гнутого на низкое ребро, причем очень типичным можно считать расположение витков в два яруса с неодинаковыми числами витков (рис. 2.42).

Обмотка последовательного возбуждения, если последнее является только вспомогательным, обычно изготовляется в виде плоских катушек и укладывается между основной обмоткой возбуждения и станиной машины; если же эта обмотка является основной обмоткой возбуждения, как в тяговых машинах, то большей частью она выполняется из голой шины прямоугольного сечения, изгибаемой как на высокое, так и на низкое ребро с изолирующими прокладками.

Специфическими для крупных машин постоянного тока являются компенсационные обмотки, предназначаемые для подавления поля реакции якоря и преодоления вносимых ею затруднений коммутации. Эти обмотки укладываются в пазы, предусматриваемые в наконечниках главных полюсов, и имеют форму обмотки однофазного тока вразвалку, окружая таким образом добавочные полюсы, соседние с главным. Пазы для компенсационной обмотки большей частью выпол-

Рис. 2.41. Подразделение катушек полюса на дисковые секции

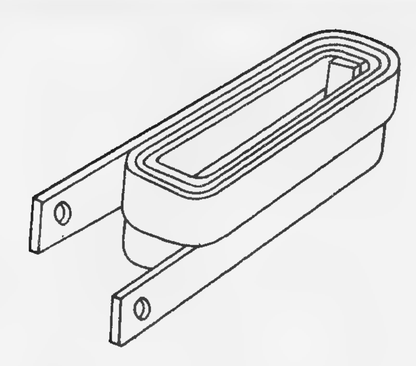


Рис. 2.42. Катушка добавочного полюса, намотанная на низкое ребро

няются полузакрытыми, вследствие чего стержни обмотки вдвигаются в них сбоку и к ним припаиваются отдельные лобовые части, обычно в виде дуг, размещаемых в плоскости, перпендикулярной оси машины, как показано на рис. 2.43. Однако в более крупных машинах встречается также применение открытых пазов, позволяющее изготовлять обмотку целыми витками и даже катушками отдельно от машины и укладывать их во вполне изолированном виде; это значительно сокращает число паек, но зато создает несколько повышенные добавочные потери на поверхности якоря. Как правило, катушки компенсационной обмотки чередуются с катушками обмотки добавочных полюсов, охватываемых ими.

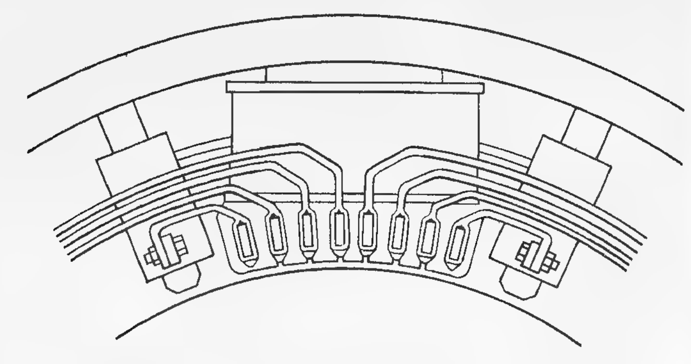


Рис. 2.43. Компенсационная обмотка машины постоянного тока

Коллектор машины постоянного тока является источником радиопомех, для борьбы с которыми применяются защитные конденсаторы. Эта борьба значительно облегчается, если применить так называемое *симметрированное* включение коммутирующих обмоток — добавочных полюсов и компенсационной, если она имеется, состоящее в том, что эти обмотки разделяются на две равные половины, включаемые по разные стороны от якоря. Это же относится и к последовательной обмотке; но если она незначительна, являясь только вспомогательной, то ее симметрирование практически ничего не дает и потому можно обойтись без него.

Глава третья

ИНДУКТИРОВАННАЯ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА

3.1. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ЗАЗОРЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

Активные стороны обмотки, заложенной в пазы сердечника электрической машины, при ее работе находятся в магнитном поле, существующем в зазоре и индуктирующем в этих активных сторонах некоторые электродвижущие силы. Такое индуктирование может носить различный характер.

В наиболее простом случае индуктирования ЭДС обмотка движется с равномерной скоростью в магнитном поле или, как это чаще встречается в машинах переменного тока, поле движется равномерно по отношению к неподвижной обмотке. Поскольку рассматриваются обмотки вращающихся электрических машин, это движение представляется как вращение с неизменной частотой.

Поле характеризуется в первую очередь числом пар полюсов, непременно только целым; оно может быть представлено периодической функцией с тем или иным периодом, длина которого не больше длины окружности зазора. На окружности зазора помещается столько периодов поля, сколько пар полюсов оно имеет; иными словами, все периоды поля принимаются во всех отношениях одинаковыми.

Любая периодическая функция может быть разложена в ряд гармонических составляющих, первая из которых, или *основная волна*, имеет ту же длину периода, что и вся функция в целом. Все остальные гармонические составляющие, называемые *высшими гармоническими*, имеют длины периодов, представляющие целые доли длины периода основной волны. В дальнейшем будет введено понятие и о низших гармонических, имеющих длину периода, бо́льшую, чем у основной волны, и о гармонических дробных порядков, периоды которых не умещаются целым числом в периоде основной волны; но в окружности машины может содержаться только целое число периодов любой гармонической, в пределе — один.

Число периодов гармонической, содержащихся в одном периоде основной волны, называется *порядком* этой гармонической ν; согласно определению порядки высших гармонических являются целыми числами или смешанными дробями, а порядки низших — простыми дробями. Если в длине окружности содержится p периодов основной волны, то самым низким порядком низших гармонических будет $1/p$, прочие порядки низших гармонических будут являться дробями вида $2/p$, $3/p$, $4/p$, ... вплоть до $\nu = 1$, т. е. до основной волны. Этот ряд может быть продлен и далее — можно рассматривать порядки вида $(p+1)/p$, $(p+2)/p$ и т. д., причем некоторые из этих дробей будут превращаться в целые

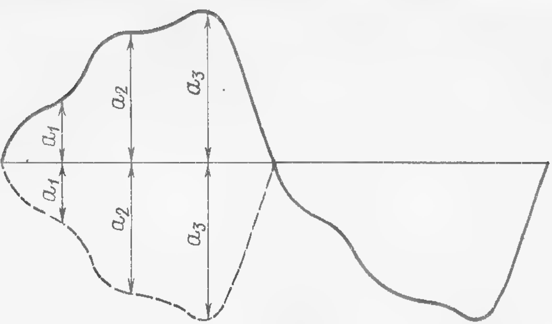


Рис. 3.1. Форма кривой, содержащей гармонические только нечетных порядков

числа, т. е. совпадать с порядками высших гармонических.

Разложение периодической функции в гармонический ряд может иметь постоянный член нулевого порядка; в применении к магнитному полю электрической машины ему будет соответствовать намагничивание по всей окружности с полярностью одного какого-либо знака — так называемое униполярное намагничивание. В синхронных и асинхронных машинах обычного исполнения с ним редко приходится считаться, но при некоторых специальных исполнениях оно играет существенную роль.

Наиболее часто магнитное поле электрической машины представляется содержащим гармонические только высших нечетных порядков. В этом случае чередующиеся условно положительные и отрицательные полуволны кривой поля имеют одинаковую форму, так что если сдвинуть одну из них под другую, как показано на рис. 3.1, они будут симметричны относительно оси абсцисс.

Если в добавление к этому все высшие гармонические пересекают ось абсцисс в одних и тех же точках с основной волной, то каждая полуволна симметрична относительно оси, перпендикулярной к оси абсцисс и проходящей через середину этой полуволны; это называется симметрией *первого рода*. Здесь могут быть два случая: знак ординат высшей гармонической вблизи от такой точки либо совпадает со знаком ординат основной волны, как показано на рис. 3.2, *а* только для одной высшей гармонической — третьего порядка, либо противоположен ему, как на рис. 3.2, *б*. В первом случае гармонические порядков 5, 9, 13 и т. д. заостряют суммарную кривую у ее вершины, а гармонические порядков 3, 7, 11 и т. д. создают у вершины некоторый провал, или уплощают кривую; во втором случае все происходит наоборот.

Если же высшие гармонические нечетных порядков пересекают ось абсцисс неодновременно с основной волной, т. е. имеют по отношению к последней сдвиг, отличный от нуля или π, то теряется симметрия каждой полуволны кривой относительно какой-либо оси, перпендикулярной оси абсцисс (рис. 3.2, *в*).

Влияние гармонических четных порядков на форму кривой

проявляется совершенно иначе. На рис. 3.3, *а* представлен случай одной гармонической — второго порядка, когда она пересекает ось абсцисс совместно с основной волной; здесь общая кривая обладает симметрией *второго рода* — относительно любой из точек пересечения ею оси абсцисс, так что всякая секущая, проведенная через такую точку, образует равные отрезки. Если же против каждой точки пересечения оси абсцисс основной волной лежит одна из вершин высшей гармонической четного порядка, как

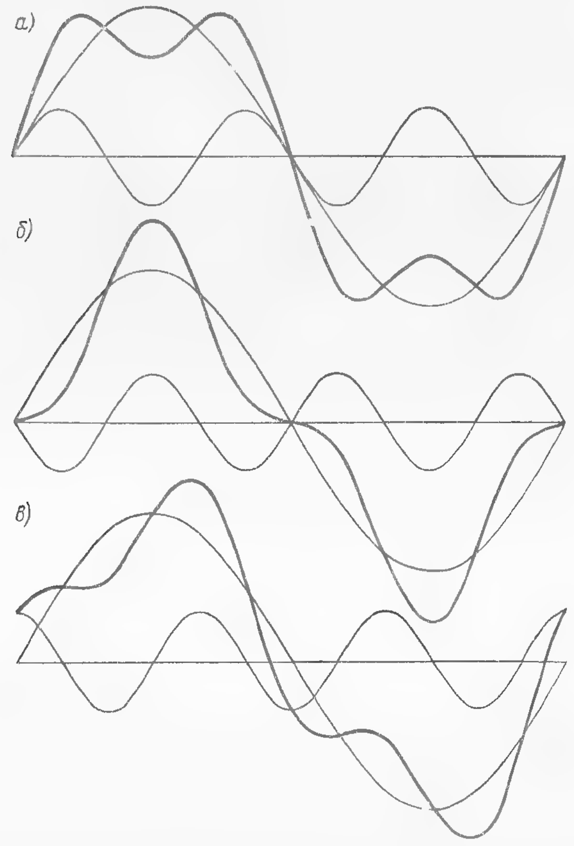


Рис. 3.2. Сложение основной волны с гармонической нечетного порядка

на рис. 3.3, *б*, то полуволны общей кривой приобретают различную форму, но каждая из них симметрична относительно оси, перпендикулярной оси абсцисс и проходящей через середину расстояния между точками пересечения оси абсцисс суммарной кривой или ее основной волной. В промежуточных случаях, когда сдвиг высшей гармонической по отношению к основной волне отличен от нуля или π, как на рис. 3.3, *в*, ни одного рода симметрии не будет.

В количественном отношении высшие гармонические характеризуются амплитудами, зачастую выражаемыми в долях амплитуды основной волны; чем эта доля больше, тем резче выражено влияние данной гармонической на форму общей кривой, но характер такого влияния остается неизменным.

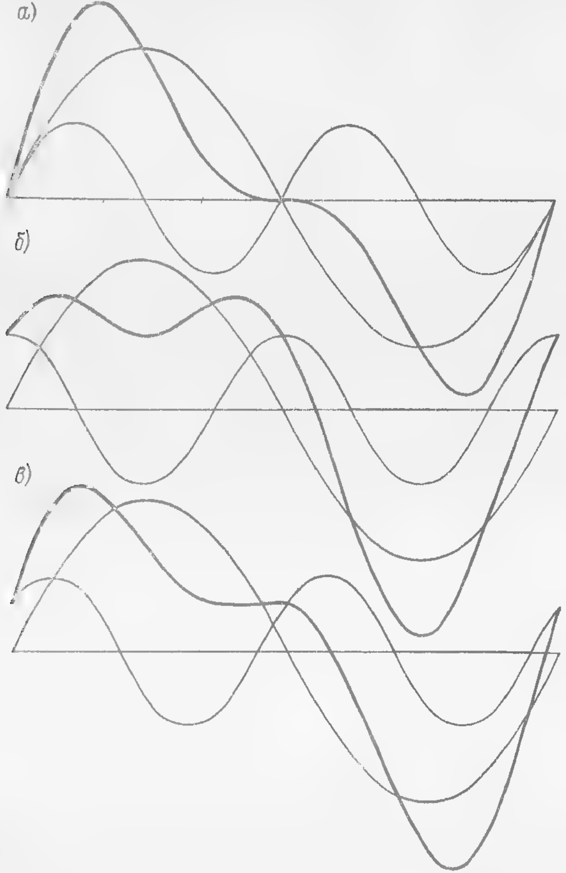


Рис. 3.3. Сложение основной волны с гармонической четного порядка

Поле неизменной формы является идеализированной картиной, которая могла бы быть справедливой только при отсутствии пазов и зубцов сердечника, несущего обмотки, и при отсутствии тока в самой обмотке. В действительности против каждого паза, хотя бы даже закрытого, в поле будет существовать провал, не изменяющий своего положения по отношению к сердечнику с обмоткой, но непрерывно перемещающийся по отношению к полю, причем форма этого провала изменяется в зависимости от его перемещения. Можно предположить, что наличие таких провалов не отражается на ЭДС, индуктированной в обмотке данным полем;

что касается отсутствия тока в обмотке, то оно не является нереальным. В целом такая картина более или менее соответствует процессу индуктирования ЭДС в обмотке якоря генератора полем его индуктора при холостом ходе. ЭДС, индуктированная в каждом проводнике или в каждой активной стороне обмотки, в этих условиях должна воспроизводить во времени кривую распределения поля в пространстве, т. е. в зазоре.

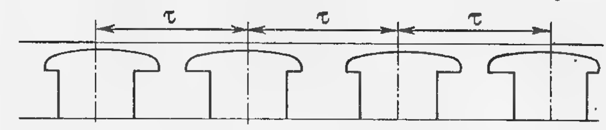


Рис. 3.4. Несимметричные наконечники явновыраженных полюсов

Форма поля индуктора зависит от его устройства, и в первую очередь от того, явнополюсный он или неявнополюсный; в первом случае наконечник каждого полюса имеет большей частью симметричную форму и расположен на равных расстояниях от соседних, а потому кривая распределения поля, создаваемого таким индуктором, симметрична относительно осей всех полюсов. Тем в большей степени это относится к полю неявнополюсного индуктора, вполне симметричного относительно оси полюсов. Следовательно, в обоих случаях кривая распределения поля индуктора состоит из гармонических только нечетных порядков.

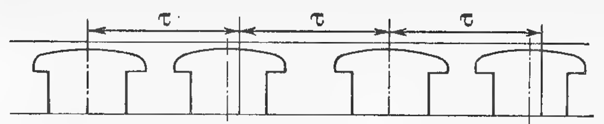


Рис. 3.5. Попарное смещение явновыраженных полюсов

Однако иногда, хотя и относительно редко, полюсные наконечники явнополюсных индукторов выполняются сознательно несимметричными. Так, они могут иметь с одной стороны более удлиненные выступы, чем с другой, попарно обращенные друг к другу (рис. 3.4); в этом случае неизбежно наступает симметрия второго рода, как на рис. 3.3, *а*, т. е. в кривой распределения поля появляются гармонические четных порядков. В других случаях полюсы вполне одинаковой формы целиком смещаются навстречу друг другу попарно, как показано на рис. 3.5, что тоже приводит к появлению гармонических четных порядков. Наконец, целые группы вполне симметричных полюсов могут быть смещены встречно, и тогда появятся гармонические не только четных порядков, но и дробных, в том числе низших. Форму кривой распределения поля явнополюсного индуктора в известной степени определяет стремление придать ей вид, близкий к синусоиде, т. е. по возможности очистить от любых высших гармонических. Однако вполне достичь этого никогда не удается из-за наличия между-

полюсных промежутков, при подходе к которым у краев наконечников поле быстро убывает и затем резко обрывается, чтобы в середине междуполюсного промежутка изменить полярность.

Достаточно типичный вид кривой распределения поля явнополюсного индуктора представлен на рис. 3.6; на нем более тонкой линией нанесена основная волна и довольно отчетливо видно, что между ней и общей кривой образуется пять площадок, попеременно выше и ниже основной волны: две — в междуполюсных промежутках, две — у краев полюсных наконечников и одна — в середине полюса. Этим пяти площадкам соответствует наличие гармонической пятого порядка, преобладающей над всеми прочими. Несколько труднее выделить гармоническую седьмого

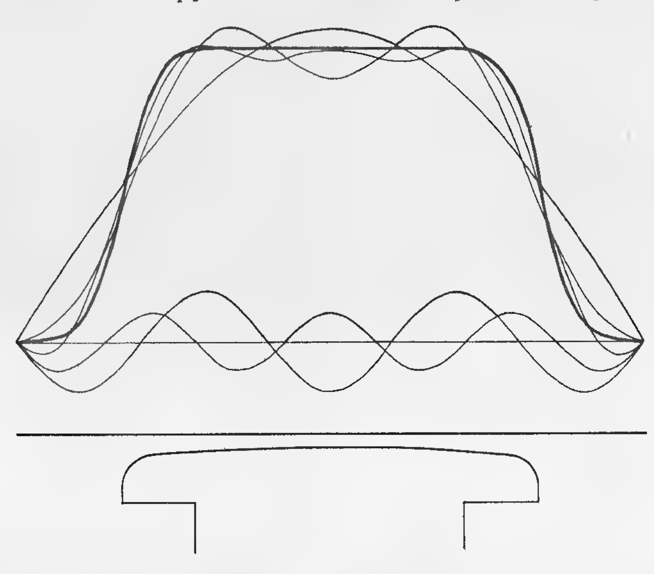


Рис. 3.6. Распределение индукции явнополюсного индуктора

порядка, выраженную более слабо; ее влияние сказывается в том, что упомянутые площадки имеют неправильную форму. Совсем трудно усмотреть влияние гармонической третьего порядка, обычно практически отсутствующей в кривой; что же касается гармонических более высоких порядков, то обнаружить их можно только методами гармонического анализа.

Так обстоит дело, когда в наконечнике полюса нет пазов для какой-либо обмотки; если же они имеются, то независимо от того, заполнены они проводниками или нет, каждый из них вызывает провал в общей более или менее плавной кривой поля. Глубина таких провалов уменьшается по мере приближения к краю полюсного наконечника, где зазор обычно больше, чем у середины полюса, и поле слабее. В зависимости от отношения шага таких пазов к полюсному делению подобные провалы вызывают появле-

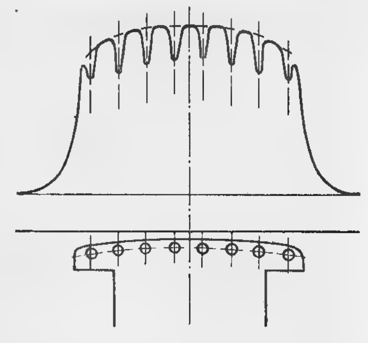


Рис. 3.7. Влияние пазов в наконечниках явнополюсного индуктора на распределение индукции

ние в кривой поля либо одной гармонической, порядок которой равен отношению этого шага к удвоенному полюсному делению, т. е. к длине периода всего поля в целом, либо биение двух гармонических, порядки которых различаются на два. Кроме того, им сопутствуют гармонические еще более высоких порядков, но последние выражены относительно слабо и особого интереса уже не представляют. Достаточно характерный вид подобной кривой представлен на рис. 3.7.

В кривых полей неявнополюсных индукторов содержание гармонической третьего порядка обычно невелико, но зато гармонические пятого и седьмого порядков выражены очень отчетливо. Кроме того, поскольку обмотка индуктора заложена в пазы, как правило, открытые, каждому из них соответствует провал; если бы не большие значения зазора, свойственные неявнополюсным машинам, эти провалы были бы более значительны, чем упомянутые выше. Порядки гармонических, определяемых пазами индуктора, обычно отличаются на ± 1 от числа делений индуктора на одну пару полюсов, которое, как правило, четно. Если в больших зубцах имеются пазы, не заполненные обмоткой, то они обычно закрываются магнитными клиньями и почти не вызывают провалов в кривой поля.

Если в обмотке якоря возникает ток, то она, в свою очередь, создает магнитное поле реакции якоря; это поле, взаимодействуя с полем индуктора, образует общее результирующее поле. При целых числах пазов на пару полюсов поле реакции якоря состоит из гармонических только нечетных порядков; в отличие от поля индуктора эти гармонические не остаются в одном и том же положении относительно основной волны, но, как будет показано в главе четвертой, вращаются с различными скоростями и в разные стороны, что очень осложняет картину взаимодействия полей индуктора и якоря. Положение основной волны поля реакции якоря по отношению к основной волне поля индуктора может быть различным; оно зависит от нагрузки машины, в первую очередь от коэффициента мощности.

В чистом виде поле реакции якоря может быть получено, если при удаленном индукторе подать питание в обмотку якоря переменным током с соответствующим числом фаз; но оно значительно слабее, чем при заложенном индукторе, поскольку магнитное сопротивление ему намного выше.

Почти то же самое может быть получено в асинхронной машине,

если питать обмотку ее статора (первичного якоря), а ротор вращать с синхронной частотой при помощи постороннего двигателя; пазы ротора будут создавать в кривой поля провалы, движущиеся вместе с основной волной так же, как провалы от пазов индуктора, явно- или неявнополюсного. Если же начать затормаживать ротор, так что он станет вращаться с некоторым скольжением, то в проводниках его обмотки возникнут токи, которые, в свою очередь, будут создавать после реакции ротора (вторичного якоря); состав этого поля зависит от устройства обмотки. В частности, если ротор снабжен обмоткой многофазного тока, например трехфазного, то поле его реакции по своей структуре будет подобно полю первичного якоря, т. е. тоже будет состоять из гармонических преимущественно нечетных порядков.

Никакой индуктор, особенно явнополюсный, не бывает изготовлен настолько идеально, чтобы его поле под всеми полюсами было вполне одинаковым; могут существовать и некоторые неточности расстановки полюсов по окружности и, особенно, различия в зазорах под разными полюсами. Все это приводит к тому, что, по существу, за период всякого поля надо бы принимать полную окружность машины; в двухполюсной машине он совпадает с периодом основной волны, но при любом ином числе пар полюсов p период основной волны в p раз меньше периода поля и, следовательно, основная волна поля индуктора сама является высшей гармонической порядка p по отношению к такому периоду. Однако обычно все эти отступления не принимаются во внимание, потому что их действия в различных местах большей частью направлены в разные стороны и взаимно компенсируются.

3.2. ЭДС В ПРОВОДНИКЕ И ВИТКЕ

Как было отмечено в предыдущем параграфе, вращающееся поле индуктора создает в каждом проводнике обмотки якоря ЭДС, которая воспроизводит во времени кривую распределения этого поля в пространстве; иными словами, мгновенное значение ЭДС в вольтах в проводнике в любой момент времени определяется равенством

$$e = -B_x v l, \tag{3.1}$$

где B_x — индукция магнитного поля в том месте, где проводник находится в данный момент, Тл; l — длина проводника, м; v — скорость относительного движения проводника в поле, м/с.

При этом предполагается, как обычно и имеет место в электрических машинах, что направления поля, самого проводника и скорости его движения взаимно перпендикулярны, проводник прямолинеен и значение индукции по всей длине l одинаково. Если от таких условий придется отступить, то это должно быть своевременно указано; пока же писать закон в более общей форме не имеет смысла.

Скорость движения проводника можно определить различными способами:

$$v = \frac{\pi D n}{60} = \frac{2\tau p n}{60} = \frac{\omega\tau}{\pi} = 2\tau f, \tag{3.2}$$

где D — диаметр окружности зазора, м; n — частота вращения поля, об/мин; τ — полюсное деление, м; f — частота индуктированной ЭДС, Гц; ω — угловая частота вращения, 1/с.

Если индукция распределена по окружности зазора синусоидально, то ее местные значения выражаются уравнением

$$B_x = B_m \sin\left(\frac{\pi x}{\tau} - \varphi\right), \tag{3.3}$$

где B_m — наибольшее значение индукции или ее амплитуда, Тл; x — линейная координата, отсчитываемая по окружности зазора от произвольной точки, м; φ — начальная фаза, зависящая от выбора начала отсчета координаты x.

В это выражение не входит число пар полюсов p; поэтому отрезок 2τ обычно называют *электрической окружностью* данной машины.

Линейная координата x связана с временем t зависимостью

$$x = vt = 2\tau f t = \frac{\omega\tau t}{\pi}; \tag{3.4}$$

отсюда уравнение для мгновенных значений индуктированной ЭДС может быть написано в виде

$$e = -B_m \frac{\omega\tau l}{\pi} \sin(\omega t - \varphi). \tag{3.5}$$

Закон распределения индукции по окружности зазора выражается равенством

$$B_x = B_0 + \sum_{\nu=1}^{\infty} B_{m\nu} \sin\left(\frac{\nu\pi x}{\tau} - \varphi_\nu\right), \tag{3.6}$$

где ν — порядки гармонических составляющих, т. е. числа натурального ряда от единицы до бесконечности; $B_{m\nu}$ — амплитуда гармонической составляющей индукции порядка ν, Тл; B_0 — постоянная составляющая индукции, или униполярная индукция, Тл.

Отсюда уравнение ЭДС получает общий вид

$$e = -\frac{\omega\tau l}{\pi}\left[B_0 + \sum_{\nu=1}^{\infty} B_{m\nu} \sin\nu(\omega t - \varphi_\nu)\right]. \tag{3.7}$$

Этот вид остается общим и для того случая, когда в распределении индукции по окружности зазора имеются гармонические низших или дробных порядков, но тогда вместо τ в уравнение (3.7)

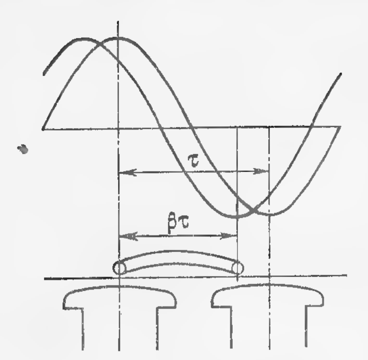


Рис. 3.8. Виток или секция с укороченным шагом

нужно подставить половину длины волны гармонической самого низшего порядка, угловую частоту ω умножить на этот порядок, а порядки всех гармонических разделить на него. Наинизший порядок может иметь гармоническая, длина волны которой равна окружности зазора; в этом случае вместо полюсного деления τ нужно подставить половину длины окружности $p\tau$, угловую частоту разделить на p, а порядки всех гармонических умножить на p. Таким образом, то, что ранее было названо основной волной, теперь само станет гармонической порядка $\nu' = p$.

В уравнении (3.7) можно сделать подстановки:

$$-\frac{\omega\tau l}{\pi} B_0 = E_0; \quad -\frac{\omega\tau l}{\pi} B_{m\nu} = E_{m\nu},$$

где E_0 — постоянная ЭДС от униполярной индукции, В; $E_{m\nu}$ — амплитуда гармонической составляющей ЭДС порядка ν, В.

Тогда ЭДС в некотором проводнике 1 будет равна

$$e' = E_0 + \sum_{\nu=1}^{\infty} E_{m\nu} \sin \nu (\omega t - \varphi_\nu). \tag{3.8}$$

Во всяком другом проводнике, например 2, расположенном на расстоянии $b = \beta\tau$ от данного по направлению вращения поля, мгновенные значения ЭДС будут выражаться подобным же уравнением, но с учетом разности фаз, вносимой этим расстоянием. Поскольку полюсному делению τ соответствует разность фаз π, расстоянию βτ будет соответствовать разность фаз βπ (рис. 3.8), и уравнение для мгновенного значения ЭДС второго проводника примет вид

$$e'' = E_0 + \sum_{\nu=1}^{\infty} E_{m\nu} \sin \nu (\omega t - \varphi_\nu - \beta\pi).$$

Если теперь соединить оба проводника лобовой частью по одну сторону сердечника, то ЭДС образовавшегося витка будет выражаться разностью ЭДС проводников, поскольку направления их обхода противоположны:

$$e' - e'' = \sum_{\nu=1}^{\infty} E_{m\nu} [\sin \nu (\omega t - \varphi_\nu) - \sin \nu (\omega t - \varphi_\nu - \beta\pi)].$$

Таким образом, ЭДС витка не содержит постоянной составляющей от униполярной индукции.

Здесь будет удобно перенести начало отсчета линейной координаты на $\beta\tau/2$ в сторону второго проводника, распределив таким образом разность фаз поровну между обоими проводниками; тогда

$$e - e' = \sum_{\nu=1}^{\infty} E_{m\nu} \left[\sin \nu \left(\omega t - \varphi_\nu + \frac{\beta\pi}{2}\right) - \sin \nu \left(\omega t - \varphi_\nu - \frac{\beta\pi}{2}\right)\right] =$$

$$= 2 \sum_{\nu=1}^{\infty} E_{m\nu} \cos \nu (\omega t - \varphi_\nu) \sin \frac{\nu\beta\pi}{2}. \tag{3.9}$$

Когда был введен множитель β, выражающий ширину витка в долях полюсного деления, не было высказано никаких предположений о его значении. Если ширина витка b равна полюсному делению τ, т. е. виток является диаметральным, то $\beta = 1$; в этом случае при любом нечетном ν

$$\sin \frac{\nu\beta\pi}{2} = \pm 1,$$

т. е. ЭДС в диаметральном витке имеет тот же состав гармонических нечетных порядков, что и индуктирующее ее магнитное поле. Но при любом четном ν

$$\sin \frac{\nu\beta\pi}{2} = 0;$$

таким образом, если в магнитном поле и содержатся гармонические четных порядков, то в ЭДС диаметрального витка они отсутствуют — виток их отфильтровывает.

Поскольку большей частью приходится иметь дело с обмотками, заложенными в пазы зубчатых якорей, отношение ширины витка к полюсному делению можно заменить отношением шага витка y к числу пазов на один полюс Q:

$$\beta = b/\tau = y/Q. \tag{3.10}$$

Первое из этих чисел (y) всегда целое, второе же (Q) может быть как целым, так и дробным, если общее число пазов на данном якоре Z не делится на число полюсов $2p$; следовательно, во вращающихся машинах дробь β может быть только рациональной.

Если шаг укорочен, то $\beta < 1$; если же он удлинен, то $\beta > 1$; так как первое встречается значительно чаще, то β принято называть *укорочением шага*, а величина

$$k_{y\nu} = \sin \frac{\nu\beta\pi}{2} \tag{3.11}$$

носит название *коэффициента укорочения шага*. Так как функция синуса симметрична относительно значения аргумента, равного $\pi/2$, то одинаковые отклонения β от единицы в обе стороны приводят к одинаковым же изменениям этого коэффициента.

Коэффициент укорочения шага обращается в нуль при всяком целом четном значении произведения $\nu\beta$ и в ± 1 — при всяком целом нечетном; очевидно, в обоих случаях необходимо, чтобы β являлось дробью со знаменателем, кратным ν. В первом случае виток оказывает на данную гармоническую отфильтровывающее действие, и этим широко пользуются, когда нужно очистить ЭДС обмотки от какой-либо гармонической. Во втором случае имеет место противоположный эффект: поскольку основная волна ЭДС уменьшена укорочением шага, данная гармоническая усиливается по сравнению с ней. Обычно это является нежелательным, но иногда находит и полезное применение, рассматриваемое в главе седьмой.

Если при некотором укорочении шага отфильтровывается гармоническая какого-нибудь порядка, то вместе с ней отфильтровываются и гармонические всех порядков, в целое число раз бóльших. Если же имеет место относительное усиление некоторой гармонической, то одновременно будут усиливаться гармонические с порядками, бóльшими в нечетное число раз, и отфильтровываться все гармонические с порядками, бóльшими в четное число раз.

3.3. КОЭФФИЦИЕНТ УКОРОЧЕНИЯ ШАГА ОБМОТКИ

Уравнения (3.7) и (3.9) позволяют построить зависимость мгновенного значения ЭДС в витке от времени, если известен закон распределения в пространстве индукции магнитного поля, индуктирующего эту ЭДС, заданный амплитудными значениями $B_{m\nu}$ и начальными фазами φ_ν всех его гармонических составляющих порядков ν. Однако практически такая задача обычно не ставится; вместо этого гораздо больший интерес представляет вопрос, каким образом ориентируются гармонические ЭДС в витке по отношению к ее основной волне, если известна ориентировка гармонических соответствующих порядков по отношению к основной волне в кривой распределения индукции магнитного поля. Из уравнений (3.6), (3.8) и (3.9) видно, что начальная фаза φ_ν в аргументе каждой гармонической функции остается неизменной независимо от того, что описывается данной функцией — магнитное поле, ЭДС в проводнике или ЭДС в витке; но при переходе от первых двух к последнему сами гармонические функции изменяются — вместо синусов в уравнении появляются косинусы. С одинаковым успехом можно было бы задать распределение индукции косинусами, и тогда ЭДС в витке выразилась бы рядом синусов, только с обратным знаком, но коэффициент укорочения шага остался бы тем же самым — соответствующим равенству (3.11).

На рис. 3.9 тонкой сплошной линией показано распределение поля, для примера состоящее из основной волны и пятой гармонической, причем последняя пересекает ось абсцисс одновременно

с первой, но в противоположном направлении, т. е. так, как было показано на рис. 3.6. Одновременно такая же кривая может представлять и ЭДС, индуктируемую полем в некотором проводнике. Точно так же будет выглядеть кривая ЭДС и во всяком другом проводнике, только она должна быть сдвинута по отношению

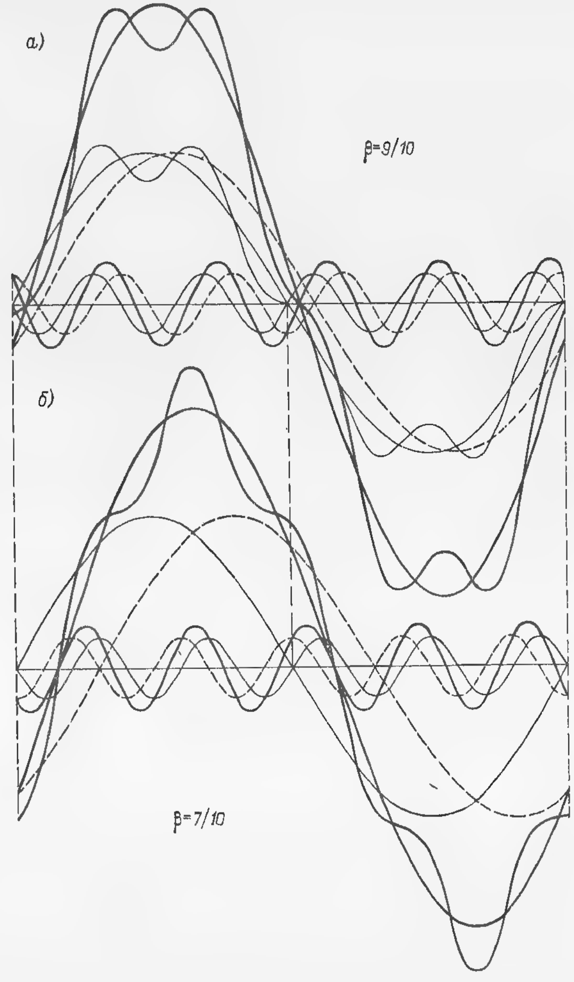


Рис. 3.9. Гармоническая нечетного порядка в кривой ЭДС при укорочении шага

к данной соответственно расположению этого проводника. На рис. 3.9, *а* показана ЭДС в проводнике, образующем с первым виток со слегка укороченным шагом — при $\beta = 9/10$; она нанесена тонкой штриховой линией. Жирными линиями даны результирующие ЭДС как составляющих гармонических, так и ЭДС в целом. Последняя мало отличается по форме от ЭДС в про-

водниках; гармоническая пятого порядка пересекает ось абсцисс совместно с основной волной, но в противоположном направлении.

Если теперь еще более укорачивать шаг, то поначалу на основной волне это отразится относительно слабо, но гармоническая пятого порядка в кривой ЭДС витка станет быстро уменьшаться, и когда укорочение примет значение $\beta = 4/5$, она исчезнет, так как в ЭДС проводников составляющие пятого порядка окажутся противоположно направленными; таким образом, данное укорочение шага отфильтрует пятую гармоническую.

При дальнейшем укорочении шага эта гармоническая снова появится в ЭДС витка, но теперь она пересекает ось абсцисс вместе с основной волной и в том же направлении. Для примера на рис. 3.9, *б* представлен случай, когда $\beta = 7/10$; в ЭДС витка данная гармоническая содержится в точно таких же размерах, как в предыдущем случае, но форма ЭДС стала совершенно другой, отнюдь не похожей на ЭДС каждого из проводников: вместо седловины на рис. 3.9, *а* здесь появилась заостренная вершина.

Все происходило бы точно так же и в том случае, если бы гармоническая пятого порядка в кривой распределения магнитного поля пересекала ось абсцисс в том же направлении, что и основная волна, только седловидная и заостренная формы поменялись бы местами. Наконец, если бы точки пересечения оси абсцисс гармонической пятого порядка не совпадали с точками ее пересечения основной волной, расположение этих точек по отношению к основной волне в кривой ЭДС витка сохранялось бы таким же, как в кривых распределения поля и ЭДС проводников; точно так же при $\beta = 4/5$ гармоническая пятого порядка отфильтруется.

Таким образом, гармоническая нечетного порядка в кривой ЭДС витка может изменить свою фазу по отношению к основной волне только на половину периода, и то лишь когда укорочение шага станет для этого достаточным. Поэтому для практических целей исследования ЭДС, индуктированных заданным магнитным полем, удобно считать, что коэффициенты укорочения шага сохраняют неизменным свой знак в интервале от единицы до значения укорочения, при котором эти коэффициенты принимают нулевые значения, как и для основной волны, т. е. плюс.

Иначе обстоит дело в отношении гармонических четных порядков. На рис. 3.10 представлено сложение основной волны с гармонической шестого порядка; как и в предыдущем случае, в кривой распределения магнитного поля и ЭДС проводника эта гармоническая пересекает ось абцисс вместе с основной волной, но если в одной из точек пересечения — в том же направлении, то в другой — в противоположном. В результате обе кривые имеют симметрию второго рода, как на рис. 3.3, *а*; при этом кривые ЭДС двух проводников являются зеркальными отображениями друг друга. На рис. 3.10, *а* дано построение для случая, когда укорочение шага еще мало отличается от единицы: $\beta = 11/12$. В ре-

зультате сложения получается кривая ЭДС витка, каждая полуволна которой имеет симметрию первого рода, но соседние полуволны совершенно не похожи одна на другую (рис. 3.3. *б*): одна имеет заостренную форму, а другая — седловину. Это происходит потому, что расположение гармонической шестого порядка по

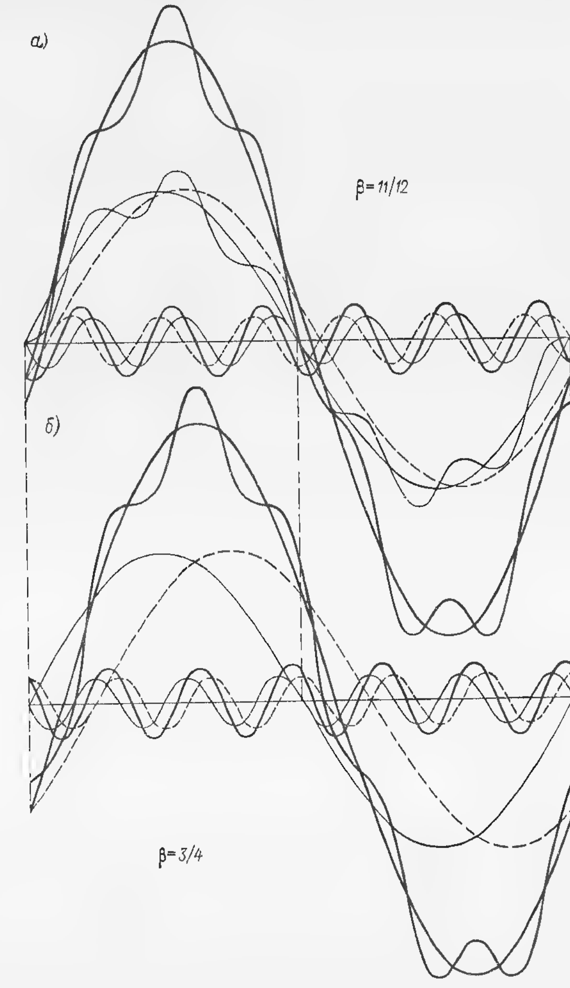


Рис. 3.10. Гармоническая четного порядка в кривой ЭДС при укорочении шага

отношению к основной волне изменилось — в кривой ЭДС витка она уже не пересекает ось абсцисс одновременно с основной волной, но имеет здесь одну из вершин.

Если увеличить укорочение шага до $\beta = 1$, то гармонические шестого порядка ЭДС проводников займут взаимно противоположные положения и в ЭДС витка отфильтруются; если же,

наоборот, еще более укорачивать шаг, то сначала, при $\beta = 5/6$, эти гармонические расположатся одинаково и будут складываться, затем при $\beta = 3/4$, как видно на рис. 3.10, *б*, займут такое же положение друг относительно друга и относительно основной волны, как на рис. 3.10, *а*, и далее в ЭДС витка станут давать все меньшую составляющую, пока при $\beta = 2/3$ не отфильтруются вовсе. При еще меньших значениях β гармоническая шестого порядка снова появится в ЭДС витка, но изменив фазу на половину своего периода. Придерживаясь здесь того же принципа в определении знака при значении коэффициента укорочения шага, что и в случае гармонических нечетных порядков, на всем интервале значений β от 1 до 2/3 нужно будет удерживать один и тот же знак.

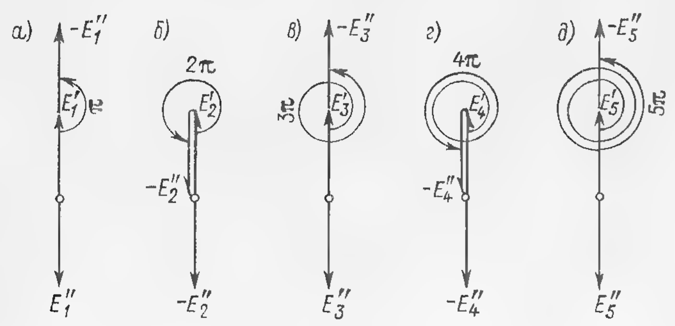


Рис. 3.11. Сложение гармонических ЭДС разных порядков при диаметральном шаге

Но если в отношении гармонических нечетных порядков логично было принять знак плюс для коэффициентов укорочения на всем интервале, в котором сложение данной гармонической происходит так же, как и при диаметральном шаге, а затем, после перехода через нулевое значение, изменить его на минус, то в отношении гармонических четных порядков такой ясности нет и для выбора знака нужно будет ввести дополнительные соображения.

Отчетливое представление о сложении гармонических ЭДС проводников, соединенных в виток, дает построение их векторов. При диаметральном шаге векторы основной волны ЭДС в проводниках E_1' и E_1'' равны по величине и направлены в противоположные стороны, поскольку эти ЭДС индуктированы полями противоположной полярности; но так как ЭДС витка является разностью ЭДС проводников, то один из этих векторов, например E_1'', должен быть повернут на 180°, после чего его можно перенести к концу вектора E_1', как показано на рис. 3.11, *а*. То же самое будет иметь место и для всех высших гармонических нечетных порядков — 3 (рис. 3.11, *в*), 5 (рис. 3.11, *д*) и т. д. Разница между ними лишь в том, что если для основной волны угол между векторами E_1' и $-E_1''$ следует считать равным π, то для всякой гармонической нечетного порядка ν он увеличивается в ν раз, т. е. будет равен $\nu\pi$.

Применение такого же построения к гармоническим четных порядков, как и следовало ожидать, приводит к взаимному уничтожению результирующих ЭДС, как это видно из рис. 3.11, *б* и *г*.

При укорочении шага β все углы станут в β раз меньшими, как это показано для ряда гармонических нечетных порядков на рис. 3.12; векторы ЭДС витка E_1, E_3, E_5, ..., E_ν постепенно поворачиваются и уменьшаются по величине, пока при некотором ν эта ЭДС не обратится в нуль (рис. 3.12, *г*). На всем интервале значений ν до этого следует считать коэффициент укорочения

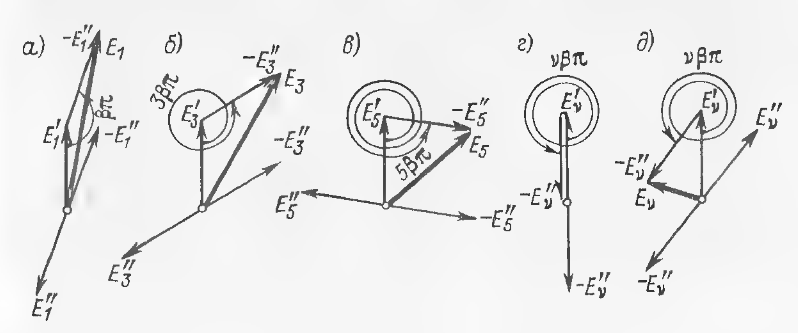


Рис. 3.12. Сложение гармонических ЭДС нечетных порядков при укороченном шаге

положительным, как и для основной волны; для более высоких значений ν он становится отрицательным, так как вектор ЭДС витка, пройдя нулевое значение, изменяет направление на обратное (рис. 3.12, *д*). То же самое будет происходить при гармонических четных порядков с той лишь разницей, что вектор ЭДС витка поначалу возрастает (рис. 3.13).

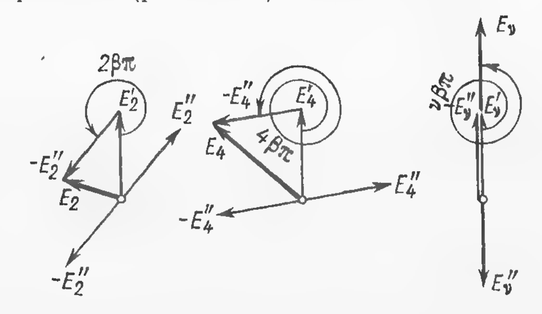


Рис. 3.13. Сложение гармонических ЭДС четных порядков при укороченном шаге

Хотя абсолютные значения коэффициентов укорочения шага всегда соответствуют равенству (3.11), но во избежание ошибок при определении знаков в процессе вычислений предпочтительно пользоваться равенствами, дающими одновременно правильные и абсолютные значения коэффициентов, и знаки, а именно:

для гармонических нечетных порядков (рис. 3.14, *а*)

$$k_{y\nu} = \sin(1 - \nu + \nu\beta)\frac{\pi}{2} = \cos\nu(1 - \beta)\frac{\pi}{2}; \qquad (3.12)$$

для гармонических четных порядков (рис. 3.14, *б*)

$$k_{y\nu} = \sin\nu(1 - \beta)\frac{\pi}{2} = \cos(1 - \nu + \nu\beta)\frac{\pi}{2}. \qquad (3.13)$$

На рис. 3.15 представлена зависимость коэффициентов $k_{y\nu}$ от укорочения шага для первых десяти гармонических; особенно замечательными значениями укорочения шага являются следующие:

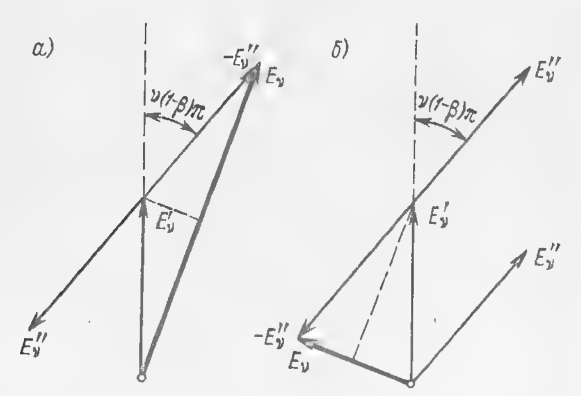


Рис. 3.14. К определению знака коэффициента укорочения шага

а) $\beta = 2/3$; при нем все кривые для гармонических порядков, не кратных трем, пересекаются при значениях $\pm\sqrt{3}/2$, а для гармонических порядков, кратных трем, — при нулевом значении;

б) $\beta = 1/2$; при нем все кривые для гармонических нечетных порядков пересекаются при значених $\pm\sqrt{2}/2$, а четных — либо при ± 1, либо, если они кратны четырем, при нулевом значении;

в) $\beta = 1/3$; при нем все кривые для гармонических нечетных порядков, не кратных трем, пересекаются при значениях $+1/2$, а нечетных, кратных трем, — при значениях -1, всех четных порядков, не кратных трем, — при значениях $\pm\sqrt{3}/2$, а кратных трем — при нулевом значении.

Всякая обмотка, составленная из витков с укороченным (или соответственно удлиненным) шагом, будет в полной мере обладать всеми свойствами, присущими таким виткам; но если путем каких-либо пересоединений в лобовых частях она может быть приведена к обмотке, составленной из диаметральных витков, то она одновременно будет обладать и теми свойствами, которые характерны для последних, в первую очередь фильтрующим действием по отношению ко всем гармоническим четных порядков.

В приложении 1 приведены все значения, которые может принимать коэффициент укорочения шага для основной волны для обмоток со всеми числами пазов на полюс до $Q = 12$ и далее кратными трем до $Q = 36$. По этому же приложению можно определять абсолютные значения коэффициентов укорочения шага и для высших гармонических любых порядков, пользуясь формулами (3.12) и (3.13). С этой целью в приложении для каждого укорочения шага, выраженного в виде как простой, так и десятичной

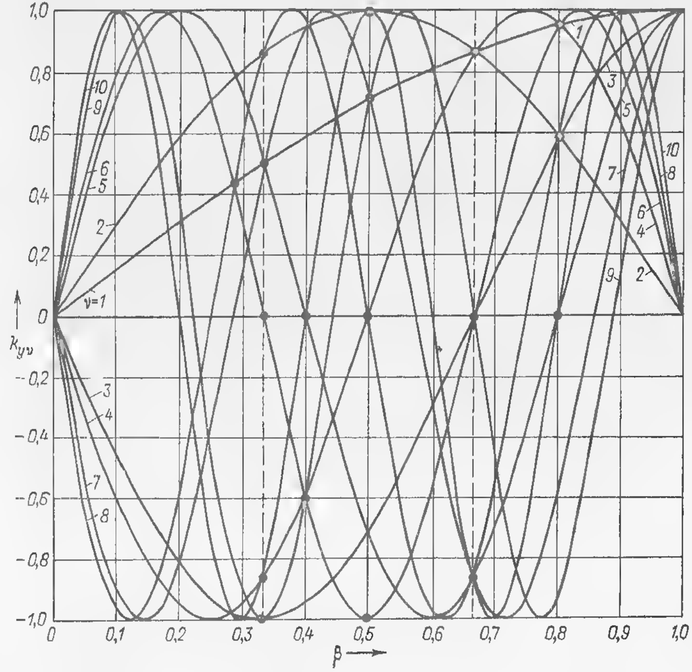


Рис. 3.15. Коэффициенты укорочения шага первых десяти гармонических

дроби, даны значения синуса и косинуса соответствующих углов первого квадранта; знаки при коэффициентах, если они представляют интерес, определяются приведением аргументов к первому квадранту сначала вычитанием из них полных окружностей, а затем определением того, в каком квадранте оказывается остаток.

Простым приемом при этом является оперирование только с множителями в аргументах, причем в виде простых дробей. Пусть, например, требуется определить коэффициент укорочения шага для гармонической порядка $\nu = 31$ обмотки трехфазного тока с числом пазов на полюс и фазу $q = 5$ и укорочением шага $\beta = 4/5$. Согласно выражению (3.12)

$$\cos\nu(1 - \beta)\frac{\pi}{2} = \cos 31\left(1 - \frac{4}{5}\right)90^\circ = \cos\frac{31}{5}\,90^\circ = \cos 558^\circ.$$

В данном случае аргумент получается в целых числах градусов, но, например, при $q = 7$ он будет являться периодической дробью, что неудобно; однако

вычислять этот аргумент нет надобности — достаточно ограничиться только входящим в него множителем, из которого нужно отнять часть, соответствующую целому числу окружностей, и по остатку судить, в какой квадрант он попадает; здесь полной окружности соответствует 20/5 и остаток 11/5 попадает в третий квадрант; следовательно, значению коэффициента укорочения $|k_{y\nu}| = 0{,}9511$ должен быть приписан знак минус.

В заключение следует отметить, что нет принципиальных препятствий к тому, чтобы рассматривать коэффициент укорочения шага не как непрерывную функцию укорочения шага β с дискретными значениями параметра — порядков ν, но как непрерывную функцию произведения $\nu\beta$. Во вращающихся машинах значения этого произведения могут быть только рациональными, поскольку источником их происхождения являются целые числа — общее число пазов на окружности машины Z, число пар полюсов p и шаг y; но в линейных машинах подобные ограничения могут отпадать и произведение $\nu\beta$ способно принимать любые значения, в том числе и иррациональные.

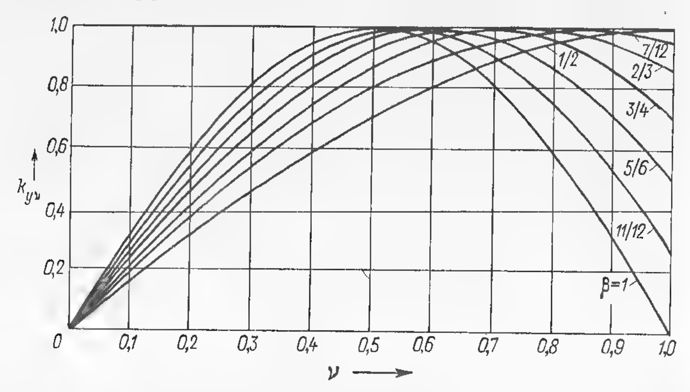


Рис. 3.16. Зависимость коэффициента укорочения шага от порядка гармонической как непрерывного аргумента

На рис. 3.16 представлены зависимости коэффициента укорочения шага от порядка гармонических как непрерывного аргумента в пределах от нуля до $\nu = 2$ для нескольких различных укорочений шага.

3.4. КОЭФФИЦИЕНТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБМОТКИ

За исключением примитивных обмоток наиболее мелких машин переменного тока в виде сосредоточенных катушек из большего или меньшего числа витков, обмотки машин переменного тока состоят из ряда секций, заложенных своими активными сторонами в пазы сердечника с теми или иными сдвигами в пространстве. Как следствие этого, между ЭДС, индуктированными в их активных сторонах вращающимся магнитным полем, возникают разности фаз, ведущие к изменению количественного, а отчасти и

качественного состава результирующей ЭДС всей обмотки в целом по сравнению с ЭДС в одном проводнике или в одной активной стороне секции.

Пока речь идет об обмотках с целыми числами пазов на полюс и фазу, на каждом полюсном делении многополюсного сердечника должно находиться одинаковое число пазов, заполненных обмоткой. Это, однако, еще не означает, что такие пазы одинаковым образом расположены на всех полюсных делениях; поэтому для начала целесообразно рассмотреть только совокупность ЭДС, индуктированных в проводниках такой группы пазов. Числа проводников в пазах этой группы большей частью одинаковы; хотя и не исключается такой случай, когда они различны, сначала следует рассмотреть лишь случай полного равенства чисел проводников во всех пазах, что позволит увеличивать подобную совокупность ЭДС в число раз, равное числу проводников в каждом пазу.

Физически такую совокупность можно представить как результирующую ЭДС всех проводников группы, соединенных последовательно, в результате чего эти ЭДС складываются определенным образом. В предположении, что под всеми полюсами индуктора поле распределено вполне одинаково, то же самое можно произвести для совокупности ЭДС в проводниках пазов всякого другого полюсного деления, оставляя пока в стороне вопрос о сопоставлении совокупностей ЭДС на различных полюсных делениях.

При условии равенства чисел проводников во всех пазах совокупности ЭДС каждого из них в отдельности могут быть представлены векторами одной и той же длины, но наклоненными друг к другу под некоторыми углами. В двухполюсной машине эти углы равны геометрическим углам между соседними пазами, т. е.

$$\alpha = 2\pi/Z,$$

где Z — полное число пазов на окружности; в машине с любым числом пар полюсов они равны

$$\alpha = \pi/Q, \tag{3.14}$$

где Q — число пазов на полюс, целое или дробное.

Число этих векторов равно числу заполненных данной обмоткой пазов q; таким образом, они составляют веерообразный пучок с q лучами, пример которого представлен на рис. 3.17, *а*; если же их перестроить так, чтобы начало каждого следующего по порядку вектора оказалось в конце предыдущего, то они образуют правильную ломаную линию, как показано на рис. 3.17, *б*. Очевидно, что замыкающая этой ломаной линии будет представлять по величине и направлению вектор совокупности ЭДС проводников рассматриваемой группы пазов как геометрическую сумму ее составляющих.

Количественно такая совокупность ЭДС будет определяться отношением модуля этой геометрической суммы к арифметической

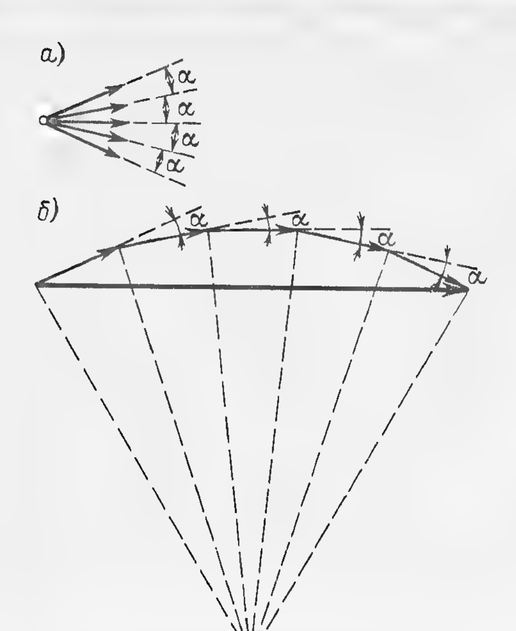


Рис. 3.17. К вычислению коэффициента распределения для основной волны

сумме ее составляющих, которое носит название *коэффициента распределения* для данной группы пазов, а если обмотка состоит из вполне одинаковых и равноудаленных групп, то и для всей обмотки в целом.

Вычисление коэффициентов распределения может производиться различными способами, каждый из которых обладает теми или иными удобствами; из них в первую очередь нужно рассмотреть следующий.

Если вокруг ломаной линии (рис. 3.17, *б*) описать дугу окружности, то каждый из векторов ЭДС будет виден из ее центра под тем же углом α, под которым они наклонены друг к другу; поэтому длина каждого из них пропорциональна синусу половины этого угла, а длина замыкающей — синусу половины угла, в q раз большего, т. е. $q\alpha$. Подстановка значения α дает выражение для коэффициента распределения

$$k_{q1} = \frac{\sin\frac{q\pi}{2Q}}{q\sin\frac{\pi}{2Q}}. \qquad (3.15)$$

Выведенное равенство дает значение коэффициента распределения для основной волны; если же поле несинусоидально, то совокупность ЭДС данной группы пазов будет содержать высшие гармонические, каждой из которых соответствует свое значение коэффициента распределения. Поскольку для всякой гармонической порядка ν все углы будут представляться в ν раз бо́льшими, чем для основной волны, значения этих коэффициентов распределения могут быть получены из следующего равенства:

$$k_{q\nu} = \frac{\sin\frac{\nu q\pi}{2Q}}{q\sin\frac{\nu\pi}{2Q}}. \qquad (3.16)$$

На рис. 3.18 последовательно представлено несколько построений диаграммы для гармонических высших порядков; замы-

кающая ломаной линии поначалу укорачивается, а при некотором порядке может обратиться в нуль, если конец последнего вектора сойдется с началом первого. После этого замыкающая изменяет направление на обратное, что соответствует перемене знака: если до сих пор значения коэффициента были положительны, то далее они становятся отрицательными. Характер дальнейшего изменения коэффициента распределения зависит от числа пазов на полюс Q: чем оно больше, тем сложнее это изменение. Для порядков

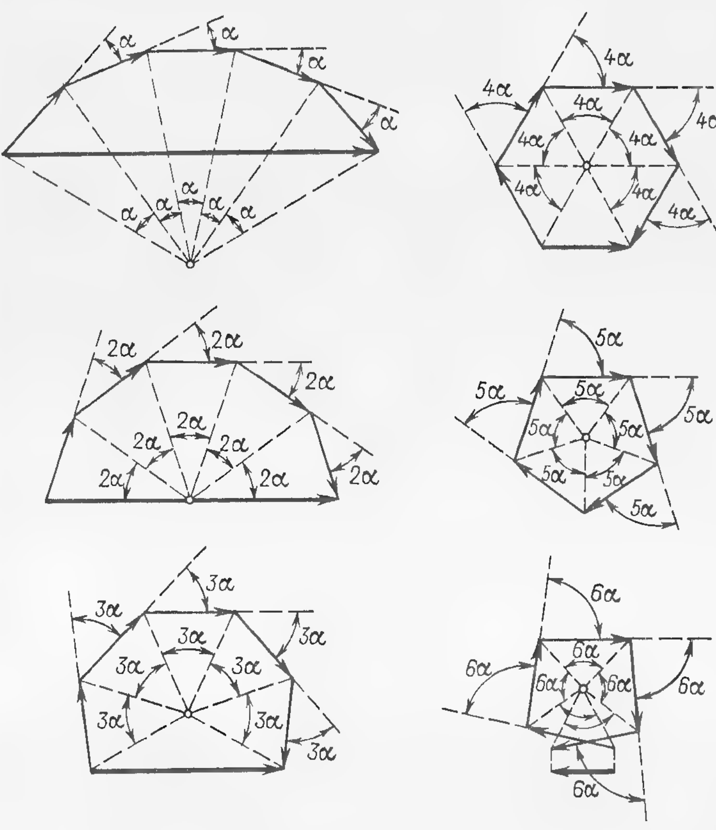


Рис. 3.18. К вычислению коэффициентов распределения для высших гармонических

гармонических $\nu = 2Q$; $4Q$; $6Q$; ...; $2iQ$, где i — любые целые числа, синусы и в числителе, и в знаменателе выражения (3.17) обращаются в нули, а получающаяся неопределенность вида 0/0 дает единицу, всегда положительную при четных значениях i; что касается нечетных значений i, то эта единица будет положительной при нечетных значениях Q и отрицательна при четных. Таким образом, коэффициент распределения, подобно коэффи-

циенту укорочения, является периодической функцией параметра ν.

Особенно замечательны значения, которые приобретает коэффициент распределения для гармонических порядков $2Q \mp 1$; $4Q \mp 1$; $6Q \mp 1$...; общее выражение для таких порядков

$$\nu_Z = 2iQ \mp 1. \tag{3.17}$$

Все они по абсолютному значению равны коэффициенту распределения для основной волны:

$$k_{q\,(2iQ\mp 1)} = \frac{\sin\frac{(2iQ \mp 1)\,q\pi}{2Q}}{q\sin\frac{(2iQ \mp 1)\,\pi}{2Q}} = \pm\frac{\sin\frac{q\pi}{2Q}}{q\sin\frac{\pi}{2Q}} = \pm k_{q1}. \tag{3.18}$$

Порядки таких гармонических носят название *зубцовых порядков*; в зависимости от значения i им присваивается наименование зубцовых порядков *первой серии*, *второй серии* и т. д.; какова бы ни была конструкция обмотки, содержание гармонических зубцовых порядков в кривой ЭДС по отношению к основной волне всегда будет таким же, как в кривой распределения индукции. При нечетных значениях q коэффициенты распределения для гармонических зубцовых порядков всегда положительны, а при четных q — положительны при четных значениях i и отрицательны при нечетных.

Примечательны также порядки гармонических, для которых коэффициент распределения принимает нулевое значение; очевидно, для этого необходимо, чтобы числитель в выражении (3.16) обращался в нуль, но знаменатель был отличен от нуля:

$$\sin\frac{\nu q\pi}{2Q} = 0; \quad \sin\frac{\nu\pi}{2Q} \neq 0;$$

следовательно, произведение такого порядка на число пазов, занятых обмоткой, должно быть кратно удвоенному числу пазов на полюс, но сам этот порядок не должен быть ему кратен. В противном случае неопределенность вида 0/0 обращается в единицу, положительную или отрицательную, а порядок, очевидно, четный, будет заключен между двумя зубцовыми порядками какой-либо серии. Таким образом, нулевые значения коэффициента распределения должны встречаться особенно часто в тех случаях, когда Q кратно q; последнее характерно для обмоток многофазных токов.

Данный способ вычисления коэффициентов распределения удобен тогда, когда требуется производить большое количество вычислений по определенному признаку, например для гармонических всех порядков ν при заданных числах пазов q и Q или для гармонических некоторого порядка ν при различных числах пазов q и Q, особенно, если последние находятся в одном и том же отношении. По условию этот способ непригоден в тех случаях, когда числа проводников в пазах неодинаковы.

Обмотки однофазного тока почти никогда не занимают все пазы полюсного деления: число пазов q, занятых обмоткой, составляет только некоторую часть $\gamma < 1$ числа пазов на полюс Q, так что

$$q = \gamma Q.$$

Сообразно этому выражение (3.17) можно переписать в виде

$$k_{q\nu} = \frac{\frac{1}{\gamma}\sin\frac{\nu\gamma\pi}{2}}{Q\sin\frac{\nu\pi}{2Q}}. \tag{3.19}$$

Числитель этого выражения не зависит от Q, а знаменатель не зависит от γ, что удобно при проведении массовых вычислений, когда, например, нужно сопоставить свойства обмоток с одинаковым значением γ при различных значениях Q или наоборот — с одинаковым значением Q при различных значениях γ.

Если придавать Q возрастающие значения, то в пределе зубцы якоря исчезнут и его поверхность окажется равномерно покрытой проводниками обмотки на протяжении части полюсного деления, равной $\gamma\tau$; получится гладкая обмотка, коэффициенты распределения которой могут быть вычислены из равенства

$$\lim_{Q\to\infty} k_{q\nu} = \frac{1}{\gamma}\sin\frac{\nu\gamma\pi}{2}\lim_{Q\to\infty}\frac{1}{Q\sin\frac{\nu\pi}{2Q}} = \frac{2}{\nu\gamma\pi}\sin\frac{\nu\gamma\pi}{2}. \tag{3.20}$$

Это равенство может быть полезным в тех случаях, когда приходится иметь дело с очень большими числами пазов. Значения коэффициентов распределения для основной волны и гармонических нескольких ближайших к ней порядков всякой такой обмотки мало отличаются от соответствующих значений для гладкой обмотки, а среди гармонических более высоких порядков интерес представляют главным образом зубцовые гармонические первой серии, для которых коэффициенты распределения по абсолютным значениям такие же, как и для основной волны.

В приложении 2 приведены коэффициенты распределения гладких обмоток с различными значениями γ для основной волны и гармонических порядков до $\nu = 20$ включительно. Особенно примечательно то, что при $\gamma = 1$, т. е. при сплошном заполнении поверхности якоря обмоткой, последняя отфильтровывает все гармонические четных порядков; но недостатком такой обмотки является очень низкое значение коэффициента распределения для основной волны, свидетельствующее о плохом использовании обмотки.

В современном электромашиностроении сколько-нибудь крупные машины однофазного тока встречаются редко, и для их якорей было бы нецелесообразно применять особые конструкции обмоток. Поэтому, как правило, такие машины снабжаются обмотками трехфазного тока, две фазы которых в последовательном соединении

составляют обмотку однофазного тока; зачастую обмотка выполняется со всеми тремя фазами, причем третья фаза рассматривается как резервная и оставляется неподключенной. Для таких обмоток $\gamma = 2/3$; в приложении 3 приведены значения их коэффициентов распределения для чисел пазов $q = 2 \ldots 20$ и $q = \infty$ или $Q = 3 \ldots 30$ и гармонических всех порядков до $\nu = 30$ включительно. Одновременно нужно упомянуть, что с таким значением γ часто выполняются обмотки неявнополюсных индукторов.

Обмотки многофазного тока с целыми числами пазов на полюс и фазу характеризуются тем, что на каждом полюсном делении проводники каждой фазы заполняют один и тот же объем пазов; таким образом, для них $\gamma = 1/m$, где m — число фаз. Отсюда выражение для коэффициента распределения получает для них общий вид

$$k_{q\nu} = \frac{\sin\frac{\nu\pi}{2m}}{q\sin\frac{\nu\pi}{2mq}}, \qquad (3.21)$$

а для гладких обмоток многофазного тока

$$\lim_{q\to\infty} k_{q\nu} = \frac{2m}{\nu\pi}\sin\frac{\nu\pi}{2m}. \qquad (3.22)$$

В частности, для обмоток двухфазного тока это дает

$$k_{q\nu} = \frac{\sin\frac{\nu\pi}{4}}{q\sin\frac{\nu\pi}{4q}} = \frac{\sin 45^\circ\nu}{q\sin 45^\circ\frac{\nu}{q}} \qquad (3.23)$$

и соответственно

$$\lim_{q\to\infty} k_{q\nu} = \frac{4}{\nu\pi}\sin\frac{\nu\pi}{4} = \frac{1{,}2732}{\nu}\sin 45^\circ\nu. \qquad (3.24)$$

Значения коэффициентов распределения обмоток двухфазного тока для чисел пазов на полюс и фазу $q = 2 \ldots 10$ и $q = \infty$ и гармонических всех порядков до $\nu = 20$ включительно приведены в приложении 4.

Для обычных обмоток трехфазного тока коэффициент распределения получается из выражений:

$$k_{q\nu} = \frac{\sin\frac{\nu\pi}{6}}{q\sin\frac{\nu\pi}{6q}} = \frac{\sin 30^\circ\nu}{q\sin 30^\circ\frac{\nu}{q}}; \qquad (3.25)$$

$$\lim_{q\to\infty} k_{q\nu} = \frac{6}{\nu\pi}\sin\frac{\nu\pi}{6} = \frac{1{,}9099}{\nu}\sin 30^\circ\nu. \qquad (3.26)$$

Значения коэффициентов распределения обмоток трехфазного тока для чисел пазов на полюс и фазу $q = 2 \ldots 12$ и $q = \infty$ и

гармонических всех порядков до $\nu = 36$ включительно приведены в приложении 5.

Столь большие числа пазов на полюс и фазу, как 12, в обмотках с целыми числами q встречаются редко, но они нужны для обмоток с дробными числами пазов на полюс и фазу, для которых и это может оказаться недостаточным.

Для видоизмененных обмоток трехфазного тока с распределением каждой фазы на дуге 120°

$$k_{q\nu} = \frac{\sin\frac{\nu\pi}{3}}{2q\sin\frac{\nu\pi}{6q}} = \frac{\sin 60^\circ\nu}{2q\sin 30^\circ\frac{\nu}{q}}; \qquad (3.27)$$

$$\lim_{q\to\infty} k_{q\nu} = \frac{3}{\nu\pi}\sin\frac{\nu\pi}{3} = \frac{0{,}9549}{\nu}\sin 60^\circ\nu. \qquad (3.28)$$

Приводить для них отдельные таблицы не требуется.

Наконец, для обмоток шестифазного тока

$$k_{q\nu} = \frac{\sin\frac{\nu\pi}{12}}{q\sin\frac{\nu\pi}{12q}} = \frac{\sin 15^\circ\nu}{q\sin 15^\circ\frac{\nu}{q}}; \qquad (3.29)$$

$$\lim_{q\to\infty} k_{q\nu} = \frac{12}{\nu\pi}\sin\frac{\nu\pi}{12} = \frac{3{,}8197}{\nu}\sin 15^\circ\nu. \qquad (3.30)$$

Значения коэффициентов распределения этих обмоток для чисел пазов на полюс и фазу $q = 2 \ldots 6$ и $q = \infty$ и гармонических порядков до $\nu = 36$ включительно даны в приложении 6.

Здесь обращают на себя внимание необычайно высокие значения коэффициента распределения для основной волны, незначительно убывающие по мере увеличения числа пазов на полюс и фазу. Правда, наряду с ними очень высоки значения коэффициентов и для гармонических ближайших порядков, но, как будет показано в дальнейшем, это обстоятельство не играет существенной роли; обмотки шестифазной системы обладают многими замечательными свойствами, очень важными для наиболее крупных машин, где они находят применение.

3.5. ДРУГИЕ СПОСОБЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Способ вычисления коэффициентов распределения, рассмотренный в предыдущем параграфе, пригоден лишь для случая, когда числа проводников во всех пазах данной группы одинаковы, а сами пазы расположены рядом. При отступлении от этих двух условий он становится непригодным; однако еще одним его недостатком, особенно проявляющимся при массовых вычислениях,

является то, что он требует выполнения деления, причем числитель принимает в зависимости от порядка гармонической периодически чередующиеся значения, к тому же изменяющие знак. Практика вычислений показывает, что это ослабляет внимание и ведет к ошибкам; поэтому в определенных условиях предпочтителен способ, исключающий деление и облегчающий определение знака, а по точности не уступающий рассмотренному.

1. Способ вычисления коэффициентов распределения, удовлетворяющий поставленному требованию, основан на том, что длина замыкающей ломаной линии равна сумме длин проекций всех ее отрезков на направление замыкающей. На рис. 3.19 представлены два случая — для нечетного и четного чисел пазов q с обмоткой. Построение можно начинать как от середины, что более удобно при нечетных q, так и с любого из концов, как только

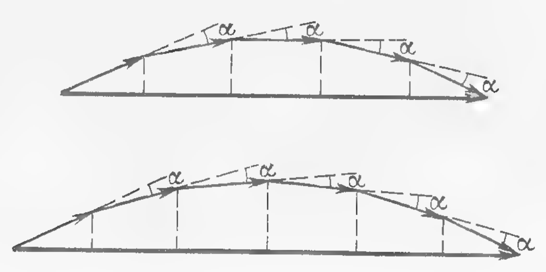


Рис. 3.19. К вычислению коэффициента распределения способом проекций

вычислен угол между двумя соседними отрезками, т. е. α для основной волны или $\nu\alpha$ для гармонической порядка ν. В любом случае первый отрезок образует с направлением замыкающей угол, в $(q-1)/2$ раз больший, т. е. $\alpha(q-1)/2$ для основной волны и $\nu\alpha(q-1)/2$ для гармонической порядка ν. При нечетных q один отрезок в середине диаграммы всегда параллелен замыкающей, а прочие образуют с ней последовательно углы $\nu\alpha$, $2\nu\alpha$, $3\nu\alpha$ и т. д.; при четных q ни один отрезок не параллелен замыкающей и углы между отрезками и ею равны $\nu\alpha/2$, $3\nu\alpha/2$, $5\nu\alpha/2$, ...

Если пазы содержат одинаковое число проводников, то достаточно просуммировать косинусы всех этих углов и разделить их сумму на число отрезков, т. е. на q, чтобы получить в результате искомое значение коэффициента распределения.

Пример 3.1. Требуется вычислить коэффициент распределения для основной волны обмотки однофазного тока, имеющей $q = 5$ и $Q = 10$. По первому способу согласно выражению (3.15)

$$k_{q1} = \frac{\sin\frac{q\pi}{2Q}}{q\sin\frac{\pi}{2Q}} = \frac{\sin 45^\circ}{5\sin 9^\circ} = \frac{0,7071}{5\cdot 0,1564} = 0,9042.$$

По второму способу

$$\begin{aligned} \cos 0^\circ &= 1,0000 \\ 2\cos 18^\circ &= 2\cdot 0,9511 = 1,9022 \\ 2\cos 36^\circ &= 2\cdot 0,8090 = 1,6180 \\ &\text{Сумма}\quad 4,5202 \end{aligned}$$

$$k_{q1} = \frac{4,5202}{5} = 0,9040.$$

Таким образом, оба способа дают результаты, одинаковые в той степени, какую допускает принятое при вычислении число знаков.

Если числа проводников в пазах неодинаковы, то к соответствующим слагаемым достаточно приписать множители, учитывающие эти числа, а результат сложения разделить на q и на сумму этих слагаемых. В обмотках якорей однофазного тока неодинаковые числа проводников практически не применяются, но зато они нередко встречаются в обмотках возбуждения неявнополюсных индукторов, где один, а иногда и бо́льшее число крайних пазов содержит меньшие числа проводников, чем остальные; этот вопрос рассмотрен в § 3.9.

В обмотках якорей переменного тока иногда бывает, что пазы, содержащие проводники данной фазы, не все находятся рядом, а например, с обоих краев их группы по одному пазу оставлено на одно зубцовое деление; при вычислении коэффициентов распределения это учитывается соответствующим увеличением углов наклона векторов ЭДС таких пазов. Первоначально такое мероприятие применялось некоторыми фирмами для подавления высших гармонических в крупных машинах с относительно большими числами пазов на полюс и фазу, в частности в турбогенераторах; с течением времени оно утратило это свое значение, однако с ним приходится сталкиваться, например, при рассмотрении обмоток с дробными числами пазов на полюс и фазу (см. § 5.5).

Пример 3.2. Требуется вычислить коэффициенты распределения для основной волны и гармонических пятого и седьмого порядков обмотки, построенной по описанному выше способу, если $q = 6$ и $Q = 18$; таким образом, распределение проводников по пазам имеет вид

1 0 1 1 1 1 0 1.

В обычной обмотке векторы основной волны ЭДС пазов имеют попарно следующие углы наклона по отношению к замыкающей: 5°, 15° и 25°, между тем как в данной обмотке эти углы равны 5°, 15° и 35°. Отсюда коэффициенты распределения:

В обычной обмотке	В обмотке с отставленными пазами
$2\cos 5^\circ = 2\cdot 0,9962 = 1,9924$	$2\cos 5^\circ = 2\cdot 0,9962 = 1,9924$
$2\cos 15^\circ = 2\cdot 0,9659 = 1,9318$	$2\cos 15^\circ = 2\cdot 0,9659 = 1,9318$
$2\cos 25^\circ = 2\cdot 0,9063 = 1,8126$	$2\cos 35^\circ = 2\cdot 0,8192 = 1,6384$
Сумма 5,7368	Сумма 5,5626
$k_{q1} = \frac{5,7368}{6} = 0,9561$	$k'_{q1} = \frac{5,5626}{6} = 0,9271$

$$\text{Отношение}\ \frac{k'_{q1}}{k_{q1}} = \frac{0,9271}{0,9561} = 0,9697.$$

Таким образом, для основной волны понижение коэффициента распределения составляет всего лишь около 3 %.

Для гармонической пятого порядка

$2\cos 25° = 2\cdot 0{,}9063 = 1{,}8126$	$2\cos 25° = 2\cdot 0{,}9063 = 1{,}8126$
$2\cos 75° = 2\cdot 0{,}2588 = 0{,}5176$	$2\cos 75° = 2\cdot 0{,}2588 = 0{,}5176$
$2\cos 125° = -2\cdot 0{,}5736 = -1{,}1472$	$2\cos 175° = -2\cdot 0{,}9962 = -1{,}9924$
Сумма $1{,}1830$	Сумма $0{,}3378$
$k_{q5} = \frac{1{,}1830}{6} = 0{,}1972$	$k'_{q5} = \frac{0{,}3378}{6} = 0{,}0563$

$$\text{Отношение } \frac{k'_{q5}}{k_{q5}} = \frac{0{,}0563}{0{,}1972} = 0{,}2855.$$

Содержание гармонической пятого порядка будет здесь более чем втрое меньшим.

Для гармонической седьмого порядка

$2\cos 35° = 2\cdot 0{,}8192 = 1{,}6384$	$2\cos 35° = 2\cdot 0{,}8192 = 1{,}6384$
$2\cos 105° = -2\cdot 0{,}2588 = -0{,}5176$	$2\cos 105° = -2\cdot 0{,}2588 = -0{,}5176$
$2\cos 175° = -2\cdot 0{,}9962 = -1{,}9924$	$2\cos 245° = -2\cdot 0{,}4226 = -0{,}8452$
Сумма $-0{,}8716$	Сумма $0{,}2756$
$k_{q7} = -\frac{0{,}8716}{6} = -0{,}1453$	$k'_{q7} = \frac{0{,}2756}{6} = 0{,}0459$

$$\text{Отношение } \frac{k'_{q7}}{k_{q7}} = -\frac{0{,}0459}{0{,}1453} = -0{,}3159.$$

Содержание гармонической седьмого порядка будет здесь тоже более чем втрое меньшим.

2. При четных значениях q бывает возможно применение еще одного приема для вычисления коэффициентов распределения. Именно, если удается разбить данную группу из q пазов на две одинаковые группы по $q/2$ пазов, смещенные друг относительно друга на некоторое число зубцовых делений, то коэффициенты распределения могут быть вычислены (или взяты по соответствующим таблицам) для обмотки с числом пазов $q/2$ и затем умножены на коэффициенты укорочения шага, соответствующие смещению.

Пример 3.3. Требуется вычислить коэффициенты распределения для основной волны обмоток из предыдущего примера, имеющих $q = 6$, разбив каждую из них на две обмотки с $q' = 6/2 = 3$ и учтя относительные смещения этих обмоток соответствующими коэффициентами укорочения шага.

Обмотка обычного устройства может быть разбита на две по следующей схеме:

исходная обмотка	1 1 1 1 1 1
первая часть	1 0 1 0 1 0
вторая »	0 1 0 1 0 1

Относительное смещение этих двух частей соответствует одному зубцовому делению исходной обмотки, т. е. при $Q = 18$ составляет 10°; следовательно, коэффициент укорочения шага здесь должен быть

$$k_{y1} = \sin 85° = 0{,}9962.$$

Обмотка с отставленными пазами допускает разбивку по схеме:

исходная обмотка	1 0 1 1 1 1 0 1
первая часть	1 0 1 0 1 0 0 0
вторая »	0 0 0 1 0 1 0 1

Здесь относительное смещение достигает уже трех зубцовых делений, т. е. 30°, и ему соответствует коэффициент укорочения шага

$$k'_{y1} = \sin 75 = 0{,}9659.$$

Коэффициент распределения при $q' = 3$ и соответственно $Q = 9$ может быть взят по приложению 5; он равен $k''_{q1} = 0{,}9598$. Отсюда коэффициенты распределения обмотки обычного устройства

$$k_{q1} = 0{,}9598\cdot 0{,}9962 = 0{,}9562$$

и обмотки с отставленными пазами

$$k'_{q1} = 0{,}9598\cdot 0{,}9659 = 0{,}9271,$$

т. е. они имеют практически те же значения, что и вычисленные в предыдущем примере.

Поскольку, как было указано выше, распределения с отставленными пазами встречаются при исследовании свойств обмоток, в частности с дробными числами пазов на полюс и фазу, представляется целесообразным привести таблицу их коэффициентов распределения; при этом достаточно ограничиться обмотками трехфазного тока с нечетными числами пазов на полюс и фазу, так как для четных чисел коэффициенты распределения получаются без затруднений только что описанным способом. Эти коэффициенты для чисел пазов $q = 3 \ldots 11$ даны в приложении 7.

Кроме того, из тех же соображений в приложении 8 даны значения коэффициентов распределения в более сложном случае — когда с каждого края группы оставлено по два паза данной фазы, также через один, для нечетных чисел пазов $q = 5 \ldots 11$. В обеих таблицах приведены значения коэффициентов только для гармонических нечетных порядков, потому что, как будет видно из § 5.4, только они могут быть использованы при исследовании обмоток с дробными числами пазов на полюс и фазу.

3. Представляя частное от деления двух гармонических функций, коэффициент распределения сам является периодической функцией; следовательно, эта функция может быть разложена в гармонический ряд. Поскольку она является четной, т. е. не изменяет своего значения при замене положительного значения аргумента на отрицательное, такой ряд не должен содержать членов с синусами; он может иметь постоянный член вида

$$a_0 = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} \frac{\sin\frac{\nu q\pi}{2Q}}{q\sin\frac{\nu\pi}{2Q}}\, d\left(\frac{\nu\pi}{2Q}\right)$$

и слагаемые с косинусами, имеющие коэффициенты

$$a_i = \frac{1}{\pi} \int\limits_0^{2\pi} \frac{\sin \frac{\nu q\pi}{2Q} \cos \frac{i\nu\pi}{2Q}}{q \sin \frac{\nu\pi}{2Q}} \, d\left(\frac{\nu\pi}{2Q}\right),$$

где i — некоторые целые числа. Оба эти выражения плохо поддаются интегрированию в неопределенном виде, но в нем и нет надобности, так как разложение может быть прямо написано по рис. 3.19. Действительно, для нечетных значений q

$$k_{q\nu} = f\left(\frac{\nu\pi}{2Q}\right) = \frac{1}{q}\left[1 + 2\cos\frac{\nu\pi}{Q} + \right.$$
$$\left. + 2\cos\frac{2\nu\pi}{Q} + \cdots + 2\cos\frac{(q-1)\,\nu\pi}{2Q}\right]$$

и для четных

$$k_{q\nu} = f\left(\frac{\nu\pi}{2Q}\right) = \frac{1}{q}\left[2\cos\frac{\nu\pi}{2Q} + 2\cos\frac{3\nu\pi}{2Q} + \cdots + 2\cos\frac{(q-1)\,\nu\pi}{2 \cdot 2Q}\right].$$

Таким образом, в этих двух случаях получаются совершенно различные разложения: при нечетных значениях q полином содержит постоянный член и состоит только из членов четных порядков, а при четных значениях q постоянного члена не содержит и состоит только из членов нечетных порядков. При этом коэффициенты при всех членах одинаковы и равны $2/q$, а постоянный член вдвое меньше их; число членов разложения во всех случаях равно $q/2$ с округлением до целого при нечетных значениях q.

На рис. 3.20 представлены первые полупериоды функции для обмоток трехфазного тока с числами пазов на полюс и фазу $q = 2 \ldots 6$; кружками отмечены значения коэффициентов распределения для всех целых значений порядков ν. Штриховыми линиями показано изменение значений коэффициентов для гармонических первых восьми порядков; для дальнейших порядков это представляется уже затруднительным, так как линии начинают пересекаться и этим загромождать график.

Не лишено интереса отметить, что форма кривой зависит только от числа пазов на полюс и фазу q, но не зависит от числа пазов на полюс Q, которое определяет лишь размещение значений коэффициентов распределения для гармонических целых порядков ν на кривой. В качестве примера на рис. 3.21 дана кривая для числа пазов на полюс и фазу $q = 5$ в пределах 1/4 периода; на ней кружками отмечены значения коэффициентов распределения для обмотки трехфазного тока с числом пазов на полюс $Q = 15$ и крестиками — для обмотки двухфазного тока, имеющей $Q = 10$, и около отметок проставлены порядки соответствующих гармонических. На этот же график можно было бы нанести значения коэффициентов распределения и для обмоток однофазного тока с раз-

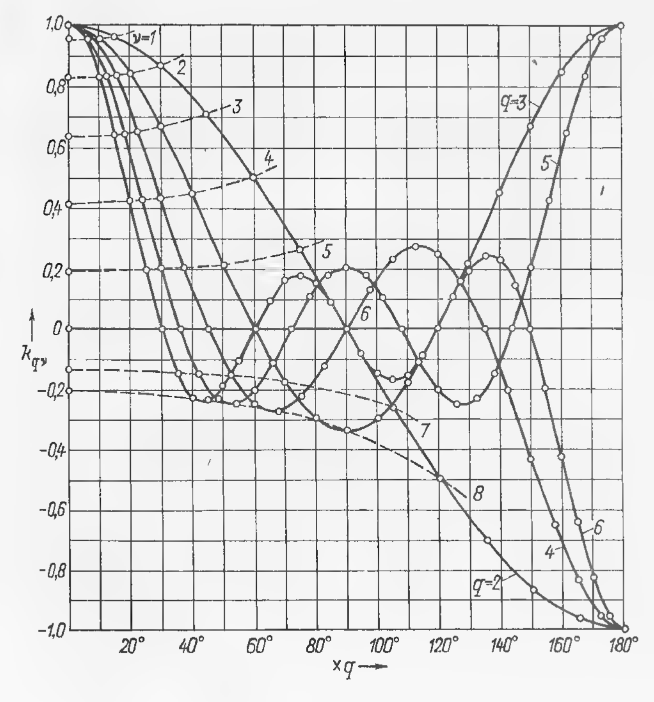
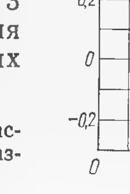


Рис. 3.20. Коэффициенты распределения при различных числах пазов на полюс и фазу

нообразными целыми значениями числа пазов на полюс Q, имеющих пять заполненных обмоткой пазов на каждом полюсном делении.

Графики для коэффициентов распределения могут быть представлены не только в прямоугольных координатах, но и в полярных, где радиус-вектор дает модуль коэффициента, а его аргументом является угол $\nu\alpha$, отсчитываемый от полярной оси; при каждом переходе радиуса-вектора через полюс диаграммы знак при модуле изменяется на обратный. При $q = 2$ такой диаграммой является окружность с диаметром на полярной оси, проходящей через полюс, но уже при $q = 3$ она превращается в улитку Паскаля или кардиоиду, а для более высоких



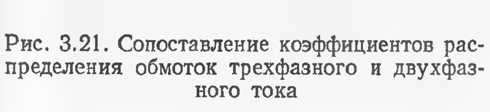


Рис. 3.21. Сопоставление коэффициентов распределения обмоток трехфазного и двухфазного тока

значений q приобретает еще более сложный характер. На рис. 3.22 даны такие диаграммы для значений q, равных 3, 4 и 5; на них отмечены кружками значения коэффициентов распределения для обмоток трехфазного тока, однако они могут быть использованы и для любых других обмоток с данными значениями q, для чего нужно соответственно изменить углы α.

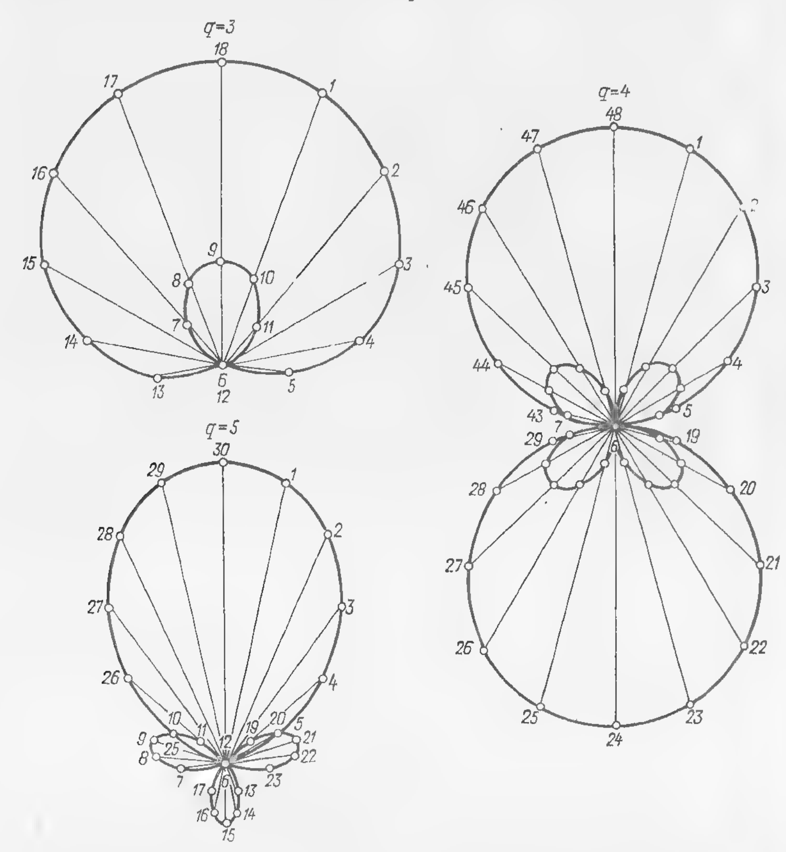


Рис. 3.22. Полярные диаграммы коэффициентов распределения

Ошибки в определении знаков коэффициентов исключаются, если на каждой петле диаграммы отмечено, какому знаку она соответствует. Разумеется, точность определения коэффициентов таким способом невелика даже при очень большом масштабе диаграмм, но зато оно выполняется легко и быстро.

Следует отметить, что все три способа пригодны для вычисления коэффициентов распределения гармонических четных порядков.

3.6. ОБМОТОЧНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ОБМОТКИ

Коэффициенты распределения $k_{q\nu}$ учитывают сложение гармонических ЭДС, индуктированных в проводниках некоторой группы из q пазов с одним и тем же направлением обхода; однако такая группа в электрической машине не может существовать изолированно, так как последовательное соединение проводников каждой группы пазов всегда осуществляется через проводники некоторой другой группы или групп пазов, в которые заложены противоположные стороны секций обмотки, и в этих последних тоже индуктируются ЭДС, складывающиеся с ЭДС в проводниках данной группы.

Если последовательное соединение проводников данной группы пазов производится через проводники другой точно такой же группы, то вне зависимости от фактической модификации обмотку всегда можно привести к равносекционной модификации с тем или иным укорочением шага β; тогда сложение ЭДС в каждой из таких секций будет определяться коэффициентами укорочения шага $k_{y\nu}$, а во всей группе секций — произведениями коэффициентов распределения на коэффициенты укорочения шага для гармонических соответствующих порядков.

Однако конечный интерес представляет сложение ЭДС не в одной группе секций, а во всей обмотке в целом, состоящей из ряда групп в последовательном, параллельном или смешанном соединении; это сложение описывается системой так называемых *обмоточных коэффициентов* обмотки $k_{w\nu}$, которые являются произведениями коэффициентов распределения $k_{q\nu}$ на коэффициенты укорочения шага $k_{y\nu}$ и еще на некоторые коэффициенты $k_{c\nu}$, учитывающие те особенности сложения ЭДС, которые зависят от характера соединения групп секций и потому могут быть названы *коэффициентами соединения* обмотки:

$$k_{w\nu} = k_{q\nu} k_{y\nu} k_{c\nu}. \qquad (3.31)$$

Если все секции заложены одной стороной в пазы данной группы, а другой стороной — в пазы другой такой же группы и могут быть приведены модификацией лобовых частей к секциям с диаметральным шагом, то обмоточные коэффициенты всей обмотки независимо от того, каким образом она соединена, для гармонических нечетных порядков равны коэффициентам распределения, а для гармонических четных порядков обращаются в нуль, потому что при диаметральном шаге коэффициенты укорочения шага для всех нечетных порядков равны единице, а для всех четных порядков — нулю. Поэтому такая группа секций может служить параллельной ветвью независимо от содержания гармонических четных порядков в кривой распределения поля; никаких уравнительных токов между параллельными ветвями от этих гармонических не будет. Число таких параллельных ветвей, очевидно, равно числу пар полюсов p.

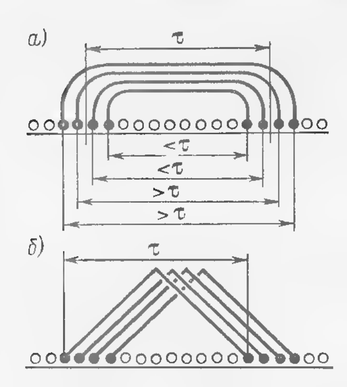


Рис. 3.23. Преобразование сосредоточенных лобовых частей

Для примера на рис. 3.23, *а* представлена обмотка, выполненная с сосредоточенными концентрическими лобовыми частями, причем в промежутках между пазами, занятыми левыми и правыми сторонами секций, находится число пазов, необходимое и достаточное для укладки сторон секций других фаз; иными словами, одна группа пазов обмотки удалена от другой точно на одно полюсное деление. На рис. 3.23, *б* показано преобразование этой обмотки в обмотку из секций с диаметральным шагом; порядок чередования сторон секций в ней изменился, но на окончательном результате сложения ЭДС это не отразится. Здесь безразлично, четными или нечетными являются число пазов на полюс и фазу и равное ему число секций в группе.

Однако положение изменится, если выполнить обмотку с этим же числом пазов на полюс и фазу в модификации вразвалку, как показано на рис. 3.24, *а*. При четном числе пазов на полюс и фазу, как на рисунке, вместо одной группы из q секций получаются две группы по $q/2$ секций, а при нечетном числе одна группа будет содержать $(q+1)/2$ секций, в то время как другая — $(q-1)/2$ секций.

Далее на рис. 3.24, *б* показано преобразование этой обмотки в равносекционную, но с шагом, меньшим диаметрального; следовательно, такая группа не способна отфильтровывать гармонические четных порядков; хотя если в последнем нет необходимости, то она может быть принята в качестве параллельной ветви. Число таких параллельных ветвей будет вдвое бо́льшим, чем в предыдущем случае, т. е. равно числу полюсов $2p$.

Но если рассматривать не одну группу из $q/2$ секций, а две такие группы в последовательном соединении, то станет возможной их замена диаметральными секциями, как показано на рис. 3.24, *в*. Число параллельных ветвей, каждая из которых является такой двойной группой, уменьшается снова до числа пар полюсов p, но зато токов от гармонических ЭДС четных порядков в них не будет. То же самое будет и при любом нечетном числе пазов на полюс и фазу, при котором вообще нет возможности поступить иначе, как соединить последовательно две группы с неравными числами секций в каждой, поскольку очевидно, что нельзя соединять такие группы параллельно.

Рис. 3.24. Преобразование лобовых частей вразвалку

Число параллельных ветвей a в обмотке обыкновенно определяется соображениями общего расчета машины; оно может быть принято равным любому первоначальному множителю числа полюсов $2p$ или произведению таких множителей. Следовательно, при четном числе пазов на полюс и фазу число групп из $q/2$ секций, входящих в каждую параллельную ветвь, будет равно частному от деления числа полюсов на число параллельных ветвей, т. е $2p/a$, что может оказаться числом как четным, так и нечетным. В первом случае гармонические четных порядков будут полностью отфильтрованы, но во втором в одной из групп они останутся неуравновешенными. Однако относительное содержание этих гармонических будет меньшим, чем в случае, когда каждая группа секций составляет параллельную ветвь, во столько раз, сколько групп входит в состав ветви. Множитель, учитывающий это обстоятельство, и является коэффициентом соединения k_c, упомянутым выше:

$$k_c = \frac{a}{2p} \quad (2p/a \text{ нечетно}). \qquad (3.32)$$

Таким образом, коэффициент соединения относится только к гармоническим четных порядков и на нечетные порядки не распространяется. Вполне естественно, что ввиду относительной редкости случаев, когда в кривой распределения индукции следует ожидать содержание гармонических четных порядков, этот коэффициент большей частью оставляется без внимания.

Непременным условием подавления гармонических четных порядков в рассматриваемых случаях является последовательное соединение двух групп из $q/2$ секций; однако оно будет достигать цели только тогда, когда последовательно соединяемые группы лежат на полюсных делениях разной нумерации — поровну нечетной и четной. На рис. 3.24 эти группы лежат на соседних полюсных делениях, т. е. если одно из них считать первым, то другое будет вторым; но с одинаковым успехом можно произвести последовательное соединение и с любой другой группой, отстоящей от первой на любое нечетное число полюсных делений, если в этом встречается необходимость.

Такая необходимость может возникнуть по соображениям предотвращения уравнительных токов от неправильной сборки машины. На рис. 3.25 представлена обмотка с нечетным числом пар полюсов $p = 3$; числа параллельных ветвей в ней могут быть: $a = 1$ (последовательное соединение всех групп); $a = 2$, 3 и 6

(параллельное соединение всех групп). Очевидно, что при $a = 1$ соблюдаются оба требования — гармонические четных порядков отфильтрованы, а неправильности сборки не вызовут уравнительных токов, потому что для последних нет контуров.

При $a = 3$ в состав каждой параллельной ветви входят две группы секций; если расположить их рядом, как на рис. 3.25, *а*, то обмотка будет отфильтровывать гармонические четных порядков, но в случае неправильной сборки машины между параллельными ветвями неизбежно возникнут уравнительные токи. Если же расположить эти группы по концам диаметра, как на рис. 3.25, *б*, то в обмотке, не теряющей фильтрующей способности, практически не будет уравнительных токов.

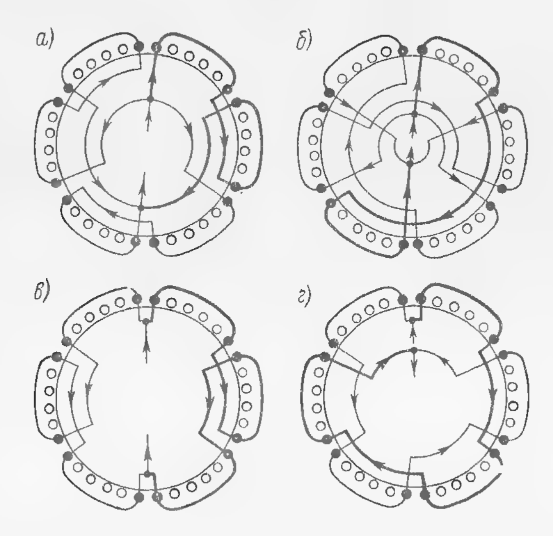


Рис. 3.25. Выполнение параллельных ветвей разными способами

При $a = 2$ в состав каждой ветви входит по три группы; полностью подавить гармонические четных порядков уже нельзя, но, соединяя последовательно группы, лежащие рядом, как на рис. 3.25, *в*, можно уменьшить их содержание втрое, зато уравнительные токи между такими ветвями при неправильной сборке неизбежны. Эти токи будут практически отсутствовать при последовательном соединении групп через одну, как на рис. 3.25, *г*, но гармонические четных порядков будут представлены полностью.

Наконец, при параллельном соединении всех групп, т. е. при $a = 6$, ни одно из этих двух требований не удовлетворяется.

Очевидно, что при четных числах пар полюсов группы секций, лежащие на концах диаметра машины, принадлежат полюсным делениям либо нечетной, либо четной нумерации; поэтому при числе параллельных ветвей, равном числу пар полюсов, нельзя

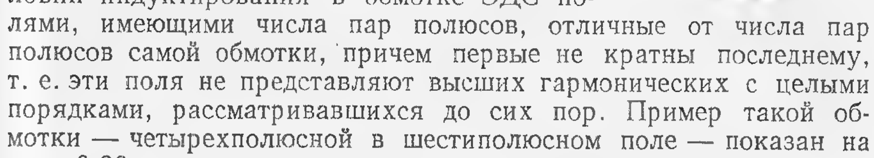


Рис. 3.26. Четырехполюсная обмотка в шестиполюсном поле

отфильтровать гармонические четных порядков и одновременно предотвратить возникновение уравнительных токов от неправильной сборки машины.

В заключение здесь нужно коснуться условий индуктирования в обмотке ЭДС полями, имеющими числа пар полюсов, отличные от числа пар полюсов самой обмотки, причем первые не кратны последнему, т. е. эти поля не представляют высших гармонических с целыми порядками, рассматривавшихся до сих пор. Пример такой обмотки — четырехполюсной в шестиполюсном поле — показан на рис. 3.26.

Если на окружности данной части машины имеется некоторое число проводников N, расположенных на равных расстояниях, и эти проводники находятся во вращающемся синусоидально-распределенном поле с числом пар полюсов p, причем числа N и p взаимно простые, то такое поле индуктирует в этих проводниках ЭДС, алгебраическая сумма которых в любой момент времени равна нулю независимо от того, четно или нечетно число проводников N. То же самое будет и в том случае, если числа N и p имеют некоторые общие множители, потому что, сократив на них оба числа, можно свести задачу к некоторым меньшим, но опять взаимно простым числам N' и p'. По этой причине, если якорь, имеющий обмотку с некоторым числом пар полюсов, находится в поле индуктора с другим числом пар полюсов, при последовательном соединении обмотки ЭДС в ней будет равна нулю, если только число пар полюсов индуктора не кратно числу пар полюсов якоря, так как тогда это поле будет представлять высшую гармоническую по отношению к данной обмотке.

Однако достаточно нарушить равномерность распределения проводников на окружности, чтобы алгебраическая сумма мгновенных значений ЭДС, индуктированных полем с любым числом пар полюсов, в общем случае перестала быть равной нулю. В применении к обмоткам с целыми числами пазов на полюс и фазу нарушением равномерности является всякое разделение на параллельные ветви; однако оно обычно не является причиной возникновения уравнительных токов от полей с иными числами пар полюсов, поскольку сами такие поля отсутствуют.

3.7. ЭДС В ОБМОТКАХ С УКОРОЧЕННЫМ ШАГОМ

Формы обмоток якорей, имеющие концентрические лобовые части, сосредоточенные или выполненные вразвалку, и с которых начинались рассуждения предыдущего параграфа, в настоящее время если и находят практическое применение, то лишь в част-

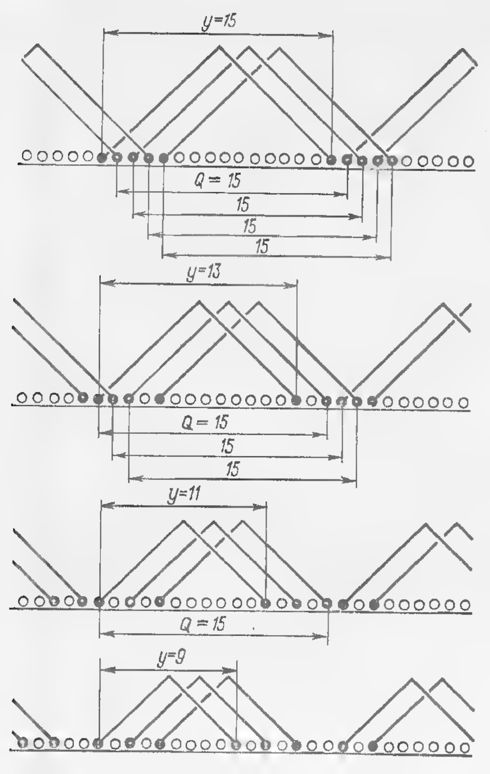


Рис. 3.27. Приведение к диаметральному шагу при различных его укорочениях в однослойной обмотке с нечетным числом пазов на полюс и фазу

ных специализированных случаях; однако полученные при этом выводы могут найти немедленное применение при рассмотрении современных форм обмоток, основным объединяющим признаком которых является исполнение равными секциями. К ним относятся однослойные обмотки с чередующимися пазами и многослойные обмотки.

Основное обстоятельство, которое следует иметь в виду при рассмотрении однослойных равносекционных обмоток с чередующимися пазами, состоит в том, что их шаг должен быть только нечетным. Исключение могут представлять обмотки однофазного тока, в которых нарушение этого правила возможно благодаря наличию незаполненных обмоткой пазов в промежутках между заполненными.

При нечетных числах пазов на полюс и фазу обмотка такого рода может быть выполнена только для числа фаз, нечетного или содержащего множителем нечетное число, потому что иначе нечетный шаг не получается; таким образом, обмотка двухфазного тока при нечетном числе пазов на полюс и фазу в этой модификации невыполнима.

На рис. 3.27 представлен ряд обмоток трехфазного тока с нечетным числом пазов на полюс и фазу $q = 5$ и с различными шагами, начиная от диаметрального шага $y = 15$. При этом шаге все пазы, заполненные данной фазой, лежат подряд; но если оставить на своих местах, например, все левые стороны секций, и укоротить шаг до первого ближайшего возможного, т. е. $y = 13$, то в каждой группе пазов, занятых этой фазой, появится по одному промежутку, в который должна лечь правая сторона секции какой-нибудь другой фазы. Существенно, что если на одном полюсном делении такой промежуток лежит в правой стороне группы пазов, то на соседнем он оказывается в левой стороне; таким об-

разом, каждая группа пазов перестает быть симметричной и они представляют зеркальное отображение друг друга. В каждой группе только по три паза могли бы быть приведены к диаметральным секциям; поэтому при наличии гармонических четных порядков в кривой распределения индукции индуктированные ими ЭДС не могут быть полностью уравновешены.

Укорочение шага до значения $y = 11$ еще более усиливает несимметричность групп пазов, в каждой из которых появляется уже по три промежутка, а число пазов, которые могут быть приведены к диаметральным секциям, сокращается до одного; следовательно, степень неуравновешенности гармонических четных порядков еще более возрастает.

При укорочении шага до $y = 9$ число промежутков достигает пяти, а пазов, которые могли бы быть приведены к диаметральным секциям, не остается вовсе. Дальнейшее укорочение шага дало бы значение $\beta < 0,5$, и поэтому на этом здесь следует остановиться.

Очевидно, что наименьшее число секций, которое может входить в состав одной параллельной ветви такой обмотки, равно числу пазов на полюс и фазу; следовательно, ветвь должна состоять из двух групп секций, одна из которых имеет на одну секцию больше, чем другая. Таким образом, число параллельных ветвей здесь не может быть больше числа пар полюсов; при этом степень неуравновешенности гармонических ЭДС четных порядков не зависит от того, соединены ли все такие ветви действительно параллельно, или из них составлены любые группы, или, наконец, вся обмотка соединена последовательно. Отсюда следует, что обмоточные коэффициенты подобных обмоток являются произведениями коэффициентов распределения на коэффициенты укорочения шага и никакого коэффициента соединения в них вводить не требуется.

Справедливость этого положения может быть подтверждена приемом, который в дальнейшем будет широко применяться, а именно построением звезды векторов ЭДС в проводниках пазов, представленным на рис. 3.28. В левой части этого рисунка изображены такие звезды для всех обмоток, показанных на рис. 3.27; векторы ЭДС в проводниках левых сторон секций обращены направо, а правых — налево. Далее звезды превращены в пучки путем поворота обращенных налево векторов на 180°, что соответствует сложению ЭДС при обходе секций; при шаге $y = 15$ все векторы пучка получились двойными, что и соответствует диаметральному шагу обмотки. Но при шаге $y = 13$ в пучке осталось только три двойных вектора, при шаге $y = 11$ — один и при шаге $y = 9$ — ни одного. В правой части рисунка каждый пучок разделен на два пучка, состоящих из q векторов, которые сначала совпадают по направлению, а затем поворачиваются так, что углы между ними соответствуют укорочению шага. Каждый из пучков можно перестроить в ломаную линию подобно тому, как это было

сделано на рис. 3.17; тогда углы, соответствующие укорочению шага, получатся между замыкающими этих ломаных линий.

Совершенно иначе происходит сложение ЭДС в обмотках равносекционной модификации с чередующимися пазами при четных числах пазов на полюс и фазу. Эти обмотки выполнимы при любом числе фаз, но никогда не могут иметь диаметрального шага, поскольку последний должен быть четным.

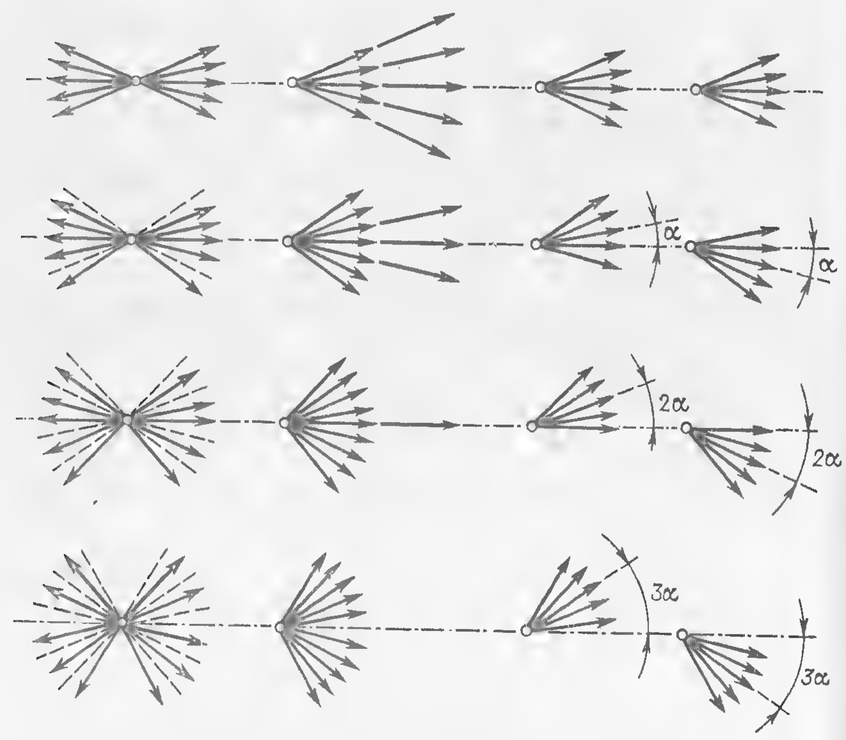


Рис. 3.28. Звезды векторов пазных ЭДС для обмоток по рис. 3.27

На рис. 3.29 даны обмотки трехфазного тока с четным числом пазов на полюс и фазу $q = 6$ и различными шагами. Когда шаг является ближайшим к диаметральному, т. е. отличается от него на единицу, в данном случае $y = 17$, все пазы, заполненные проводниками данной фазы, лежат подряд. Первое укорочение шага до $y = 15$ вызывает появление промежутков между пазами данной фазы, причем эти промежутки расположены одинаково во всех группах пазов и симметрично относительно их середин.

Это не нарушается и при всех дальнейших укорочениях шага, несмотря на то, что число промежутков возрастает на 2 при каждом очередном укорочении; в лобовых частях секции составляют одинаковые группы по $q/2$ секций в каждой. Если не обращать внимание на гармонические четных порядков, то каждая такая

группа секций может представлять параллельную ветвь; следовательно, число возможных параллельных ветвей здесь возрастает до числа полюсов, что при нечетных числах пазов на полюс и фазу недостижимо.

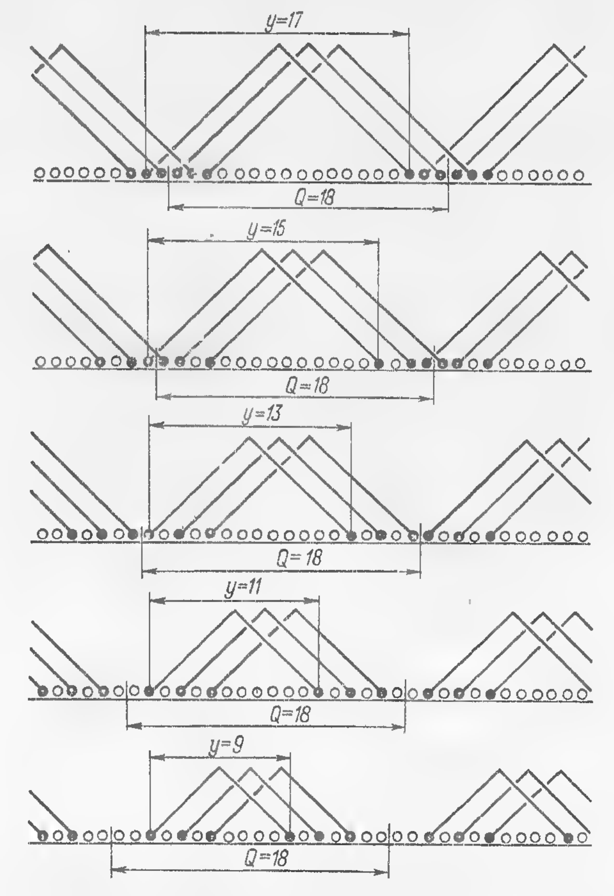


Рис. 3.29. Приведение к диаметральному шагу при различных его укорочениях в однослойной обмотке с четным числом пазов на полюс и фазу

Построение звезд векторов ЭДС в проводниках пазов одной группы секций на рис. 3.30 показывает, что в них, как и следовало ожидать, после преобразования звезды в пучок ни одного двойного вектора не получается; если же разложить эти пучки на два по примеру рис. 3.28, то оказывается, что каждый из таких пучков содержит $q/2$ векторов только левых или только правых сторон секций и поворачивается постепенно так, что углы между ними соответствуют укорочению шага. Поэтому, как и в предыдущем случае, обмоточные коэффициенты здесь могут быть получены

умножением коэффициентов распределения, но не для данного числа пазов на полюс и фазу q, а только для его половины $q/2$, на коэффициенты укорочения шага, а поскольку гармонические четных порядков не отфильтровываются приведением секций к диаметральным, то еще и на коэффициент соединения, соответствующий схеме обмотки, как это было рассмотрено в предыдущем параграфе.

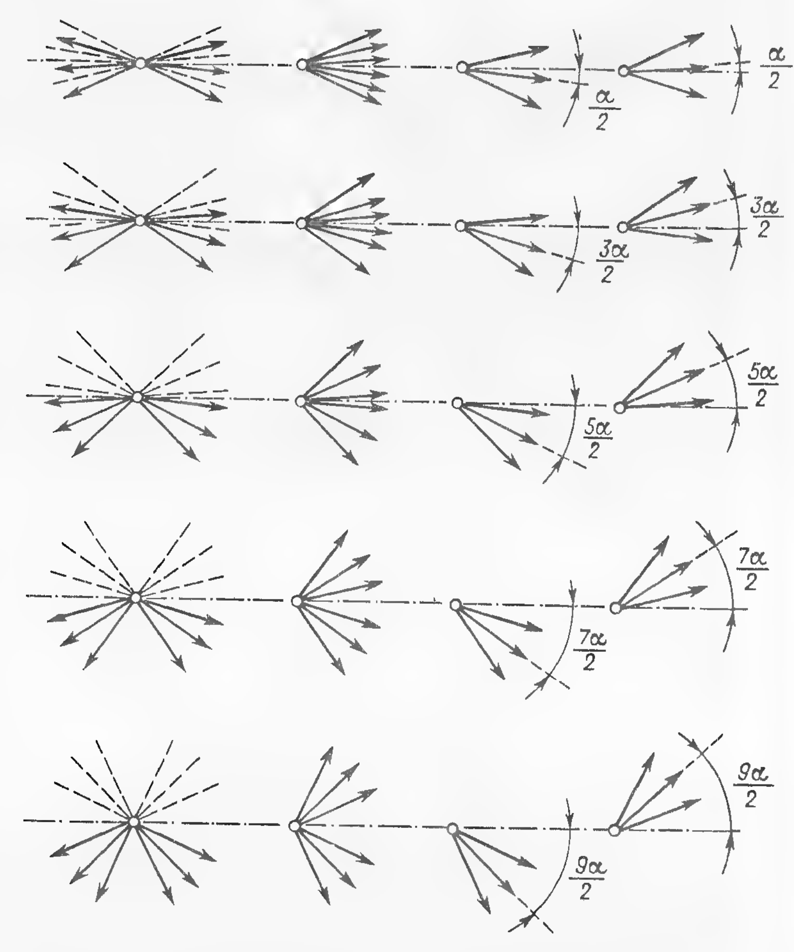


Рис. 3.30. Звезды векторов пазных ЭДС для обмоток по рис. 3.29

В приложении 9 даны значения обмоточных коэффициентов для однослойных обмоток с четными числами пазов на полюс и фазу при значении коэффициента соединения $k_c = 1$ и с различными укорочениями шага. При этом для чисел пазов на полюс и фазу до шести включительно в это приложение включены все

возможные укорочения шага $\beta \geqslant 0,5$; но для более высоких чисел пазов — только по два ближайших к 0,8, так как для них другие значения укорочения маловероятны.

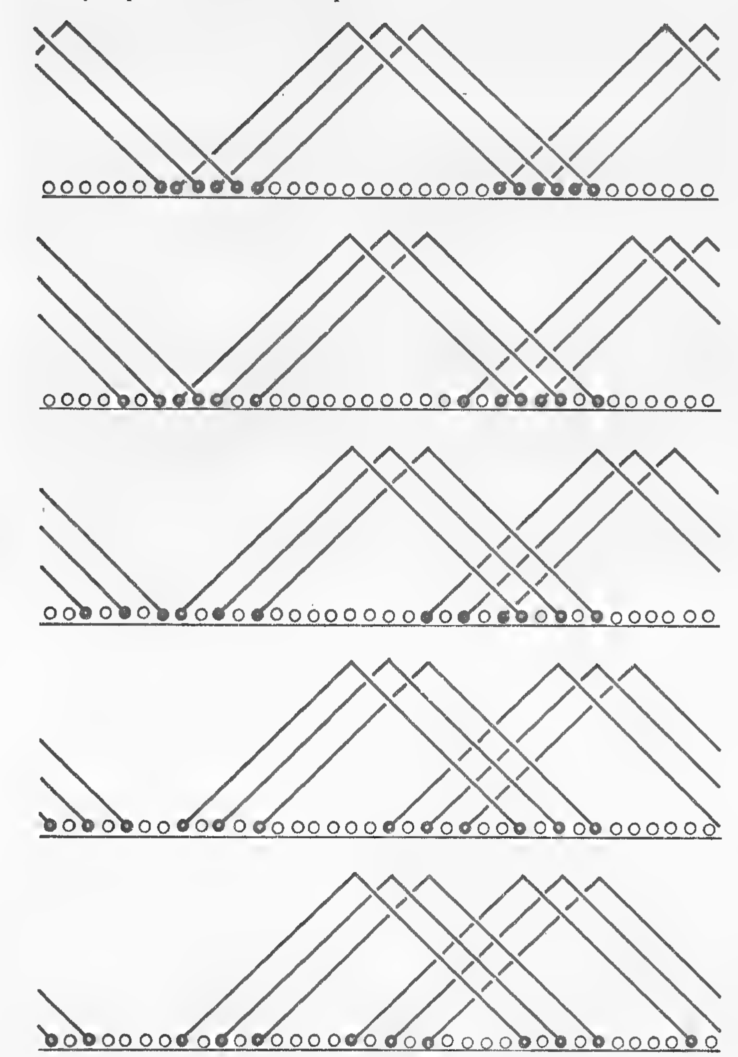


Рис. 3.31. Приведение обмотки к диаметральному шагу

Если теперь рассмотреть не одну группу из $q/2$ секций, а две такие группы, лежащие рядом и соединенные последовательно, то все секции могут быть приведены к диаметральным, как это изображено на рис. 3.31; хотя фактическое исполнение таких обмоток было бы чрезвычайно неудобно, это не препятствует их рассмотрению. В пределах каждой диаметральной секции гармони-

ческие всех четных порядков отфильтровываются, поэтому и вся обмотка свободна от них. Каждая такая двойная группа может служить параллельной ветвью, следовательно, наибольшее их число уменьшается здесь до числа пар полюсов; другие возможные числа параллельных ветвей равны, очевидно, любым множителям этого числа. Обмоточные коэффициенты подобных обмоток для гармонических нечетных порядков не отличаются от содержащихся в приложении 9, а для четных порядков обращаются в нули.

В отличие от однослойных обмоток с укорочением шага, двухслойные обмотки с целыми числами пазов на полюс и фазу всегда состоят из вполне одинаковых групп, каждая из которых содержит число секций, равное числу пазов на полюс и фазу. Эти обмотки

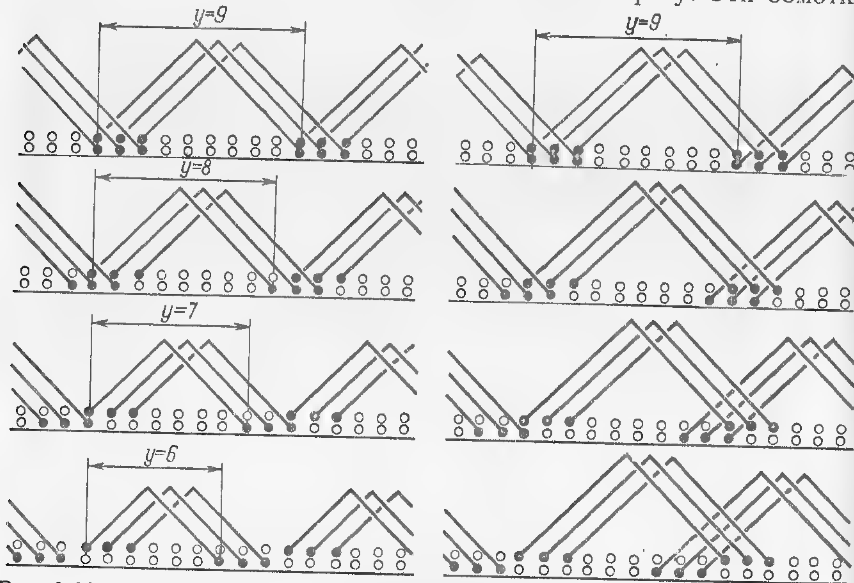


Рис. 3.32. Приведение к диаметральному шагу при различных его укорочениях в двухслойной обмотке

всегда могут быть приведены к диаметральным секциям при том же условии, что и однослойные обмотки с четными числами пазов на полюс и фазу, т. е. при последовательном соединении двух групп секций, лежащих либо рядом, либо на полюсных делениях одной и той же нумерации — нечетной или четной.

Для иллюстрации на рис. 3.32 в левой части представлены двухслойные обмотки с различными укорочениями шага, а в правой — их преобразования в обмотки из диаметральных секций. При диаметральном шаге все пазы содержат стороны секций только одной какой-либо фазы; но как только предпринимается укорочение шага, сейчас же появляются пазы, занятые только до половины сторонами секций этой фазы, а на освободившиеся места попадают стороны секций других фаз. При этом числа таких

пазов по обе стороны рассматриваемой группы одинаковы, так что каждая группа симметрична; несущественно, что с одной стороны данная фаза занимает нижние половины пазов, а с другой — верхние, так как на индуктировании ЭДС полем индуктора это не отражается. Поэтому несущественно и то, что в правой части рисунка правые стороны секций попадают в тот же слой, в котором лежат левые стороны, так что двухслойная обмотка превращается как бы в наложение двух однослойных обмоток.

При некотором укорочении шага исчезают пазы, занятые сторонами секций одной и той же фазы; это происходит тогда, когда шаг становится равным

$$y = Q - q = \frac{m-1}{m} Q. \tag{3.33}$$

Если производить укорочение шага и дальше, то при его значении, равном $q - 1$, снова должны появиться пазы, содержащие стороны секций одной только данной фазы, но с противоположными направлениями обхода, так что индуктированные в них гармонические ЭДС всех порядков, в том числе и основной волны, будут взаимно уравновешиваться, что нецелесообразно. Впрочем, раньше уже упоминалось, что практически не приходится иметь дело с укорочениями ниже $\beta = 0{,}5$.

Таким образом, если не придавать значения гармоническим четных порядков и не добиваться отсутствия уравнительных токов от неправильной сборки машины, то число параллельных ветвей двухслойной обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу всегда может быть сделано равным числу полюсов, а обмоточные коэффициенты при этом будут равны произведениям коэффициентов распределения для данного числа пазов на полюс и фазу на коэффициенты укорочения шага и на коэффициенты соединения. Приложение 10 дает их значения для различных чисел пазов на полюс и фазу и разных укорочений шага; подобно приложению 9, в него включены только такие укорочения, которые могут встречаться при соответствующих числах пазов на полюс и фазу в обычной практике, а именно до $q = 6$ включительно — для всех укорочений шага $\beta \geqslant 0{,}5$ и при более высоких значениях q — только для укорочений, близких к 0,8.

Обмотки шестифазного тока, как правило, выполняются двухслойными, и потому к ним может быть приложено все, что было сказано выше в отношении двухслойных обмоток трехфазного тока. По причинам, которые будут разъяснены в следующей главе, в них нормально применяется укорочение шага $\beta = 11/12$; однако оно может быть выполнено только при четных числах пазов на полюс и фазу, так что при нечетных остается лишь принять одно из двух ближайших к нему.

Значения обмоточных коэффициентов обмоток шестифазного тока с реально применяемыми укорочениями шага даны в приложении 11.

3.8. СОПРЯЖЕННАЯ ЭДС ОБМОТОК МНОГОФАЗНОГО ТОКА

Все рассуждения, приведенные выше в данной главе, касались индуктирования ЭДС в обмотке однофазного тока или в одной фазе обмотки многофазного тока, рассматриваемой отдельно, вне связи с другими фазами. Однако если для обмотки однофазного тока такое рассмотрение является исчерпывающим, то для обмоток многофазного тока оно недостаточно, потому что в подавляющем большинстве случаев фазы такой обмотки работают не обособленно друг от друга, а находясь в определенном соединении между собой, или *сопряжении фаз*. Как правило, это сопряжение оказывает определенное воздействие на ЭДС, индуктированную в обмотке.

Для обмоток двухфазного тока возможен только один вид сопряжения фаз — когда начала или концы обеих фаз электрически соединены в одну точку; передача энергии двухфазной системы производится по трем проводам, один из которых присоединен к этой точке, а два других — к оставшимся свободными выводам фаз. Последние два носят при этом название *линейных* проводов, а первый — *общего* провода. Иногда его неправильно называют нейтральным по аналогии с системой трехфазного тока; это неверно потому, что нейтральный провод трехфазной системы при полной симметричности фаз и одинаковости условий их работы не несет тока, между тем как общий провод системы двухфазного тока нагружен током, превосходящим токи в линейных проводах почти в полтора раза.

Напряжение, измеренное между любым из линейных проводов системы двухфазного тока и общим проводом, называемое *фазным*, при отсутствии нагрузки дает значение ЭДС данной фазы; но напряжение, измеренное в этих же условиях между обоими линейными проводами, отличается от фазных не только по измеренному значению, но и по гармоническому составу; оно называется *междуфазным* или *линейным*. Особенностью двухфазной системы является то, что в ней принципиально безразлично, какие именно выводы фаз соединены в общую точку — от этого будет зависеть лишь абсолютная фаза линейного напряжения, которой можно придавать четыре значения, последовательно различающиеся на четверть периода основной волны. Таким образом, условность понятий о началах и концах фазных обмоток здесь особенно велика — их выбор в одной фазе совершенно не влияет на выбор в другой.

Уравнения гармонической ЭДС порядка ν двух фаз могут быть написаны следующим образом:

для первой фазы

$$e'_\nu = E_{m\nu} \cos \nu (\omega t - \pi/4);$$

для второй фазы

$$e''_\nu = E_{m\nu} \cos \nu (\omega t + \pi/4).$$

Гармоническая этого же порядка в линейной ЭДС будет являться разностью этих двух гармонических:

$$e_\nu = e'_\nu - e''_\nu = E_{m\nu} \left[\cos \nu \left(\omega t - \frac{\pi}{4} \right) - \cos \nu \left(\omega t + \frac{\pi}{4} \right) \right] =$$

$$= 2E_{m\nu} \sin \nu\omega t \sin \frac{\nu\pi}{4}. \qquad (3.34)$$

1. Для $\nu = 1, 3, 9, 11$ и т. д.

$$\sin \frac{\nu\pi}{4} = \frac{\sqrt{2}}{2},$$

т. е. содержание гармонических этих нечетных порядков, в том числе основной волны, в линейной ЭДС в $\sqrt{2}$ раза больше, чем в фазных ЭДС, причем относительное расположение всех гармонических этих порядков по отношению к основной волне сохраняется неизменным.

2. Для $\nu = 5, 7, 13, 15$ и т. д.

$$\sin \frac{\nu\pi}{4} = -\frac{\sqrt{2}}{2};$$

гармонические этих нечетных порядков, подобно предыдущим, в линейной ЭДС возрастают в таком же отношении, но в отличие от первых изменяют свое расположение по отношению к основной волне на обратное.

3. Для $\nu = 2, 10, 18$ и т. д.

$$\sin \frac{\nu\pi}{4} = 1,$$

т. е. содержание гармонических этих четных порядков, не кратных четырем, удваивается в линейной ЭДС против фазной, а их расположение по отношению к основной волне сохраняется неизменным.

4. Для $\nu = 6, 14, 22$ и т. д.

$$\sin \frac{\nu\pi}{4} = -1;$$

гармонические этих четных порядков, не кратных четырем, подобно предыдущим, в линейной ЭДС удваиваются против фазной и изменяют свое расположение по отношению к основной волне на противоположное.

5. Для $\nu = 4, 8, 12...$, т. е. для четных порядков, кратных четырем,

$$\sin \frac{\nu\pi}{4} = 0;$$

гармонические этих порядков в линейной ЭДС не содержатся.

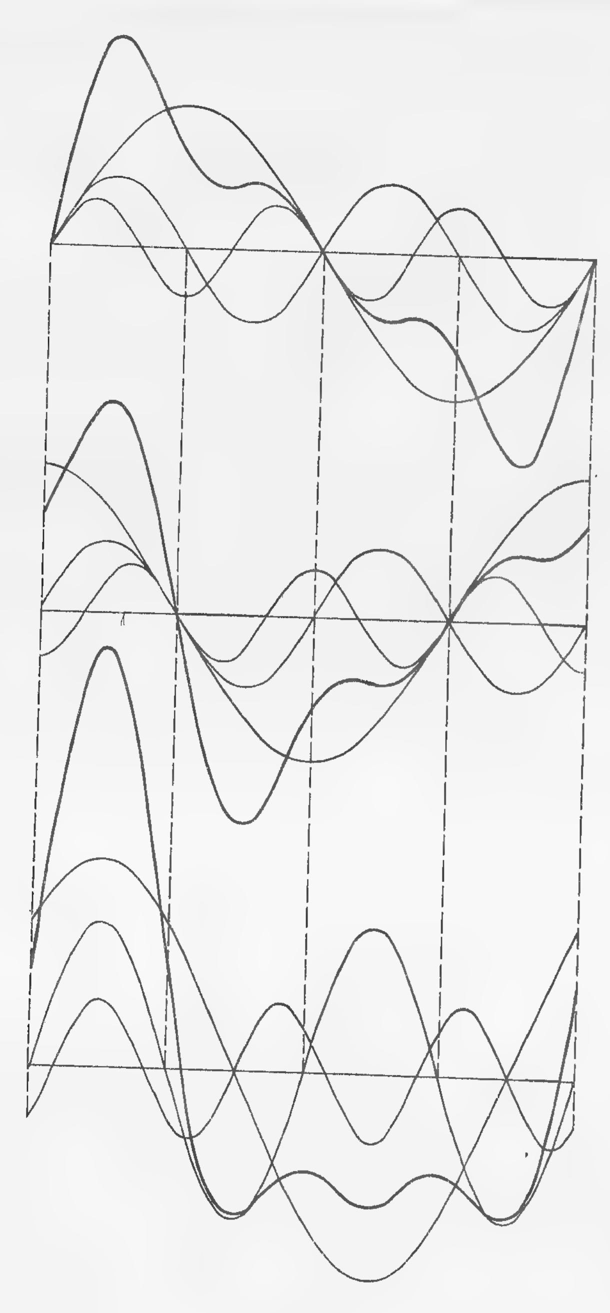


Рис. 3.33. Образование линейной ЭДС из двух фазных

Множители $k_{p\nu} = \pm\sqrt{2}$, ± 1 и 0, дающие количественный переход гармонического состава от фазной ЭДС к линейной, могут быть названы *коэффициентами сопряжения фаз* для гармонических соответствующих порядков.

На рис. 3.33 представлено образование линейной ЭДС из двух фазных для основной волны и гармонических порядков $\nu = 2$ и 3; поскольку согласно выражению (3.34) ЭДС второй фазы вычитается из ЭДС первой фазы, на рисунке их амплитуды обратно пропорциональны их порядкам; такое содержание этих ЭДС является преувеличением, но зато отчетливо показывает, что форма кривой линейной ЭДС ухудшается по сравнению с фазной.

Для обмотки трехфазного тока возможны два вида сопряжения фаз — в звезду, когда начала или концы всех трех фаз соединяются в общую нулевую точку, правильно называемую здесь *нейтралью*, и в треугольник, когда начало одной фазы соединяется с концом другой и т. д., пока не получится замкнутый контур. Понятия о началах и концах фаз и здесь остаются условными, но в отличие от обмоток двухфазного тока выбор начала или конца одной из фаз предопределяет их выбор и в прочих фазах.

Как правило, при сопряжении фаз в звезду к нулевой точке во вращающихся машинах либо вовсе не присоединяется никакой провод, вплоть до того, что она остается скрытой среди соединений обмотки, либо если и присоединяется, то лишь в целях заземления или защиты; в первом случае фазное напряжение, а стало быть, и фазная ЭДС вообще не могут быть измерены и доступными для измерения остаются только три линейных напряжения между линейными проводами.

Уравнения гармонических порядка ν фазных ЭДС двух каких-нибудь фаз обмотки трехфазного тока могут быть представлены так:

для первой фазы

$$e'_\nu = E_{m\nu} \cos \nu (\omega t - \pi/3);$$

для второй фазы

$$e''_\nu = E_{m\nu} \cos \nu (\omega t + \pi/3).$$

Поступая по-предыдущему, для гармонической этого порядка линейной ЭДС при сопряжении фаз в звезду следует написать

$$e_\nu = e'_\nu - e''_\nu = E_{m\nu} \left[\cos \nu \left(\omega t - \frac{\pi}{3}\right) - \cos \nu \left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right)\right] =$$
$$= 2E_{m\nu} \sin \nu\omega t \sin \frac{\nu\pi}{3}. \qquad (3.35)$$

1. При $\nu = 1, 2, 7, 8$ и т. д.

$$\sin \frac{\nu\pi}{3} = \frac{\sqrt{3}}{2};$$

гармонические этих нечетных и четных порядков, не кратных трем, в линейной ЭДС имеют амплитуды, в $\sqrt{3}$ раза бо́льшие, чем в фазной, и сохраняют свое расположение относительно основной волны.

2. При $\nu = 4, 5, 10, 11$ и т. д.

$$\sin\frac{\nu\pi}{3} = -\frac{\sqrt{3}}{2},$$

т. е. гармонические этих нечетных и четных порядков, не кратных трем, подобно предыдущим, в линейной ЭДС имеют во столько же раз бо́льшие амплитуды, чем в фазной, но изменяют свое расположение по отношению к основной волне.

3. При $\nu = 3, 6, 9, 12\ldots$, т. е. для всех порядков, кратных трем,

$$\sin\frac{\nu\pi}{3} = 0;$$

гармонические таких порядков в линейной ЭДС не содержатся.

Таким образом, для обмотки трехфазного тока существуют только значения коэффициентов сопряжения фаз $k_{p\nu} = \pm\sqrt{3}$ и 0, и здесь сравнение обмоток двухфазного и трехфазного тока показывает явное преимущество вторых по сравнению с первыми.

При сопряжении фаз в треугольник нулевая точка отсутствует, к трем вершинам треугольника присоединяются три линейных провода и, таким образом, линейным напряжением становится фазное. Но величина, которая при этом может быть измерена, даже при отсутствии нагрузки, не является фазной ЭДС, потому что в ней не содержатся гармонические с порядками, кратными трем, как и в линейной ЭДС в случае сопряжения в звезду; различие здесь состоит только в том, что гармонические всех прочих порядков сохраняют свое расположение по отношению к основной волне.

Причина этого состоит в том, что гармонические с порядками, кратными трем, во всех трех фазах в любой момент времени одинаковы по величине и направлению и потому способны создавать токи внутри замкнутого контура треугольника; эти токи, по существу, следует считать уравнительными. Отсюда следует, насколько важно предотвращать причины их возникновения, если машина предназначается для работы с сопряжением фаз в треугольник.

Обмотка шестифазного тока, являющаяся сочетанием двух обмоток трехфазного тока, не нуждается во введении каких-либо дополнительных значений коэффициентов сопряжения фаз, так как напряжения между фазами, принадлежащими разным обмоткам трехфазного тока, для рассматриваемой темы не имеют смысла.

3.9. КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБМОТОК НЕЯВНОПОЛЮСНЫХ ИНДУКТОРОВ

Обмотка неявнополюсного индуктора характеризуется числом делений окружности Z_2 и числом пазов z_2, заполненных обмоткой. В данном случае $Q = Z_2/2$ и $q = z_2/2$; все числа Z_2 и z_2, Q и q — обычно четные.

Формулы (3.15) и (3.16) справедливы только, когда число проводников s во всех пазах одинаково. Однако в турбогенераторах, особенно крупных, нередко практикуется укладка меньшего числа проводников в пазы, ближайшие к большому зубцу ротора; в этом случае вычисление коэффициента распределения осложняется. Общим приемом для вычисления будет являться подразделение такой обмотки на части, содержащие пазы с одинаковыми числами проводников, вычисление коэффициента распределения для каждой из них в отдельности и нахождение по ним окончательного результата для всей составной обмотки в целом.

Такая операция может быть произведена различными способами, которые проще всего рассмотреть на конкретном примере; из него будет ясно, что вывод общих формул для этой цели был бы нецелесообразен.

Пример 3.4. Индуктор турбогенератора имеет: число делений окружности $Z_2 = 46$; число обмотанных пазов $z_2 = 36$; в каждом пазу число проводников $s = 15$, кроме пазов, непосредственно примыкающих к большому зубцу, в которых число проводников $s' = 13$. Разделение обмотки можно произвести на две части, но несколькими разными способами.

Способ 1. Обмотка разбивается на две части, одна из которых содержит число обмотанных пазов $z_2 = 36$, как у всей обмотки в целом, с числом проводников в пазу $s' = 13$, а другая — число обмотанных пазов $z_2' = 32$ с числом проводников в каждом $s'' = s - s' = 15 - 13 = 2$.

Коэффициент распределения первой части тот же, который имела бы вся обмотка при одинаковом числе проводников во всех пазах:

$$k_q' = \frac{\sin\frac{q\pi}{2Q}}{q\sin\frac{\pi}{2Q}} = \frac{2\sin\frac{z_2\pi}{2Z_2}}{z_2\sin\frac{\pi}{Z_2}} = \frac{2\sin\frac{36\cdot 90°}{46}}{36\sin\frac{2\cdot 90°}{46}}.$$

Здесь

$$\sin\frac{36\cdot 90°}{46} = \sin 70°26' = 0{,}9423;$$

$$\sin\frac{2\cdot 90°}{46} = \sin 3°54{,}8' = 0{,}06824;$$

таким образом,

$$k_q' = \frac{0{,}9423}{18\cdot 0{,}06824} = 0{,}7671.$$

Коэффициент распределения второй части получается аналогично:

$$k_q'' = \frac{2\sin\frac{z_2'\pi}{2Z_2}}{z_2'\sin\frac{\pi}{Z_2}} = \frac{2\sin\frac{32\cdot 90°}{46}}{32\sin\frac{2\cdot 90°}{46}} = \frac{0{,}8879}{16\cdot 0{,}06824} = 0{,}8132.$$

Тогда коэффициент распределения всей обмотки в целом будет

$$k_q = \frac{s' z_2 k_q' + s'' z_2' k_q''}{s' z_2 + s'' z_2'} = \frac{13 \cdot 18 \cdot 0{,}7671 + 2 \cdot 16 \cdot 0{,}8132}{13 \cdot 18 + 2 \cdot 16} = 0{,}7726.$$

Способ 2. Обмотка представляется состоящей из части с числом обмотанных пазов $z_2'' = 32$ и с числом проводников в пазу $s = 15$ и части, состоящей только из одной катушки на полюс, т. е. с числом обмотанных пазов $z_2 = 4$, с числом проводников $s' = 13$.

Ширина этой катушки составляет число пазных делений

$$\frac{1}{2}(Z_2 - z_2) + 1 = \frac{1}{2}(46 - 36) + 1 = 6.$$

Поэтому ее коэффициент распределения равен

$$k_q''' = \sin\frac{6 \cdot 90°}{46} = \sin 23°28{,}7' = 0{,}3984.$$

Отсюда коэффициент распределения всей обмотки будет

$$k_q = \frac{s z_2' k_q'' + s' z_2'' k_q'''}{s z_2' + s' z_2''} = \frac{15 \cdot 32 \cdot 0{,}8132 + 13 \cdot 4 \cdot 0{,}3984}{15 \cdot 32 + 13 \cdot 4} = 0{,}7726.$$

Способ 3. Встречно обмотке, содержащей $z_2 = 36$ обмотанных пазов, в каждом из которых лежит $s = 15$ проводников, включена катушка с шириной в 6 пазных делений, состоящая из двух витков, т. е. с $s'' = 2$.

Коэффициент распределения всей такой системы представится в виде

$$k_q = \frac{s z_2 k_q' - s'' z_2'' k_q'''}{s z_2 - s'' z_2''} = \frac{15 \cdot 36 \cdot 0{,}7671 - 2 \cdot 4 \cdot 0{,}3984}{15 \cdot 36 - 2 \cdot 4} = 0{,}7726.$$

Таким образом, все три способа вычисления дают одинаковые результаты. Следует указать на то, что соответствующий одному зубцовому делению угол π/Z_2, синус которого входит в знаменатель всех выражений для коэффициента распределения, всегда довольно мал; но как сам этот угол, так и его синус в процессе вычисления умножаются на относительно большие множители, и потому во избежание накопления ошибки вычисление этого угла следует производить достаточно точно, а его синус брать по таблицам с большей точностью, чем синусы прочих углов.

В частном случае, когда число проводников в n пазах, непосредственно прилегающих к большому зубцу, составляет половину числа проводников в прочих пазах, что может встречаться в машинах с непосредственным водяным охлаждением обмотки индуктора, когда число проводников в пазах мало, вычисление коэффициента распределения можно вести, как для двухслойной обмотки с числом пазов на полюс и фазу $q' = q - n$ и с укорочением шага на соответствующее число зубцовых делений.

Наиболее существенным фактором для обмоток неявнополюсных индукторов является соотношение γ между числом обмотанных пазов z_2 и числом делений Z_2. При слишком малых значениях этого соотношения коэффициенты распределения, которые могут быть взяты из приложения 2, имеют относительно высокие значения, поскольку z_2 обычно достаточно велико, но при ограниченной глубине пазов нет возможности заложить в них достаточное число витков обмотки возбуждения. При значениях γ, приближающихся к единице, т. е. при приближении к распределению пазов по всей окружности индуктора, и той же глубине пазов число витков становится избыточным — прибавление его сверх некоторого оптимума становится малоэффективным. Наивыгоднейшее соотношение γ соответствует максимуму произведения γ на квадрат соответствующего ему коэффициента распределения, что дает значение $\gamma = 0{,}7420$. В действительности большинство построенных турбогенераторов имеет значения γ в пределах от 0,7 до 0,8. Коэффициенты распределения для различных чисел обмотанных пазов и чисел делений в этих пределах их соотношения даны в приложении 12. Понятно, что данные этого приложения относятся только к случаю, когда число проводников во всех пазах одинаково.

3.10. ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ЭДС

Индуктирование ЭДС в обмотках во всех рассмотренных выше случаях происходило за счет относительного перемещения этих обмоток в магнитном поле. Такое перемещение может осуществляться либо движением якоря, несущего данную обмотку, в поле неподвижного индуктора, либо наоборот — движением индуктора относительно неподвижного якоря, либо движением того и другого с разными скоростями. Наконец, возможно индуктирование ЭДС и без помощи механического движения якоря и индуктора, если последний способен создавать магнитное поле, движущееся относительно его самого, как это свойственно системам многофазных переменных токов.

Однако для индуктирования ЭДС наличие любого из перечисленных видов движения отнюдь не обязательно; если магнитодвижущая сила неподвижного индуктора изменяется, то в обмотке неподвижного якоря будет индуктироваться некоторая ЭДС. Поскольку индуктирование ЭДС без какого бы то ни было движения характерно для трансформаторов, ЭДС такого рода в электрических машинах называются *трансформаторными*. Основной интерес для обмоток электрических машин переменного тока представляют трансформаторные ЭДС, обусловленные периодическим изменением магнитного поля индуктора, в первую очередь имеющего то же число пар полюсов, что и обмотка якоря.

Пусть на якоре находится один диаметральный виток и ось двухполюсного индуктора совпадает с осью этого витка, как в верхней части рис. 3.34; тогда весь магнитный поток индуктора, входящий в якорь, сцеплен с этим витком, причем так, что индукция на сторонах витка равна нулю; для этого достаточно, чтобы распределение индукции на обоих полюсных делениях было оди-

наковым. Если поток индуктора Ф начнет периодически изменяться, то в витке индуктируется ЭДС

$$e \doteq -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Здесь пока не играет никакой роли распределение индукции в пределах полюсного деления, но зато существен закон изменения потока во времени. Если поток изменяется синусоидально, то и

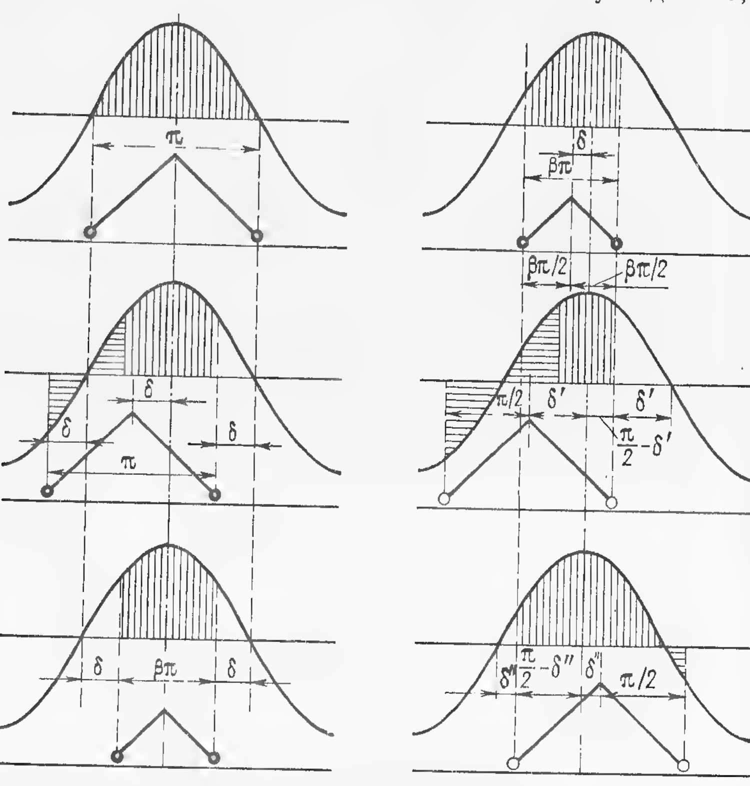


Рис. 3.34. Индуктирование трансформаторной ЭДС при совпадении осей витка и поля

Рис. 3.35. Индуктирование трансформаторной ЭДС при несовпадении осей витка и поля

ЭДС синусоидальна; при несинусоидальном изменении потока несинусоидальной станет и ЭДС, но закон ее изменения будет иным — она будет содержать гармонические тех же порядков, что и закон изменения потока во времени, кроме нулевого порядка. Гармоническая составляющая нулевого порядка закона изменения потока во времени, т. е. постоянное намагничивание какой-нибудь полярности, как не зависящая от времени, составляющей ЭДС не даст.

Действительно, пусть магнитный поток изменяется во времени по периодическому закону

$$\Phi_t = \sum \Phi_{m\nu} \sin \nu (\omega t - \varphi_\nu), \qquad (3.36)$$

где $\Phi_{m\nu}$ — амплитуда составляющей порядка ν; ω — угловая частота основной волны изменения потока; φ_ν — начальная фаза гармонической порядка ν.

Для упрощения можно считать, что для основной волны $\varphi_1 = 0$, так что для гармонических всех прочих порядков φ_ν характеризует их расположение по отношению к основной волне. Тогда

$$e = -\frac{d}{dt}\sum \Phi_{m\nu} \sin \nu (\omega t - \varphi_\nu) = -\sum \Phi_{m\nu} \nu\omega \cos \nu (\omega s - \varphi_\nu); \qquad (3.37)$$

таким образом, содержание высших гармонических в ЭДС возрастает по сравнению с их содержанием в законе изменения потока в число раз, равное порядку гармонической.

Если теперь сместить ось витка по отношению к оси потока на некоторый угол δ, как в средней части рис. 3.34, то виток будет связан уже не со всем потоком, входящим в якорь, а только с некоторой его частью, заштрихованной вертикально, зависящей не только от угла наклона δ, но и от распределения индукции по полюсному делению; горизонтально заштрихованные части потока взаимно уравновешиваются. Если обозначить часть потока, связанную теперь с витком, по отношению к полному потоку некоторым коэффициентом $k_\delta < 1$, то изменение ЭДС в витке во времени может быть получено из выражения (3.36) приписыванием этого коэффициента к его правой части.

Аналогичная картина получится и в случае, если ось потока совпадает с осью витка, но последний имеет не диаметральный шаг, а укороченный, как показано в нижней части рис. 3.34; между укорочением шага β и равноценным ему углом наклона δ имеется зависимость

$$\delta = (1-\beta)\frac{\pi}{2}; \quad \beta = 1 - \frac{2\delta}{\pi}.$$

Наконец, в общем случае ось витка с укорочением шага β наклонена к оси потока на угол δ (рис. 3.35). Часть полного потока, связанная с витком, равна полусумме частей этого потока, которые были бы связаны с диаметральными витками, имеющими оси, наклоненные к оси потока на углы δ' и δ'':

$$\delta' = (1-\beta)\frac{\pi}{2} + \delta; \quad \delta'' = (1-\beta)\frac{\pi}{2} - \delta.$$

Если индукция распределена по полюсному делению синусоидально, как на рис. 3.34 и 3.35, то при условии, что эта синусоидальность не нарушается при всех изменениях потока во вре-

мени, она может быть представлена уравнением

$$B_x = B_m \sin\left(\frac{\pi x}{\tau} - \varphi\right).$$

Здесь B_m — амплитуда индукции, изменяющаяся во времени по тому же закону, по которому изменяется магнитный поток, т. е. по выражению (3.36), а φ — начальная фаза, которую в большинстве случаев можно положить равной нулю. Тогда мгновенное значение Φ_t магнитного потока на единицу длины сердечника будет

$$\Phi_t = \int_{x'}^{x''} B_x dx = B_m \int_{x'}^{x''} \sin\frac{\pi x}{\tau} dx = -B_m \frac{\tau}{\pi} \cos\frac{\pi x}{\tau}\Big|_{x'}^{x''},$$

где x' и x'' — координаты сторон витка; согласно рис. 3.35, если между осями потока и витка имеется угол δ, то

$$x' = \frac{\tau}{2} - \frac{\delta\tau}{\pi} - \frac{\beta\tau}{2}; \quad x'' = \frac{\tau}{2} - \frac{\delta\tau}{\pi} + \frac{\beta\tau}{2};$$

следовательно,

$$\Phi_t = -B_m \frac{\tau}{\pi}\left[\cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta + \frac{\beta\pi}{2}\right) - \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta - \frac{\beta\pi}{2}\right)\right] =$$

$$= -B_m \frac{\tau}{\pi}\left[\cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)\cos\frac{\beta\pi}{2} - \sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)\sin\frac{\beta\pi}{2} -\right.$$

$$\left. -\cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)\cos\frac{\beta\pi}{2} - \sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)\sin\frac{\beta\pi}{2}\right] =$$

$$= 2B_m \frac{\tau}{\pi}\sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)\sin\frac{\beta\pi}{2} = 2B_m \frac{\tau}{\pi}\cos\delta \sin\frac{\beta\pi}{2}. \quad (3.38)$$

В частности, если $\beta\tau/2 = \delta\tau/\pi$, т. е. если одна из сторон витка находится на оси магнитного потока, то

$$\Phi_t = B_m \frac{\tau}{\pi}\sin\beta\pi. \quad (3.39)$$

В действительности индукция никогда не бывает распределенной по полюсному делению синусоидально; если ее распределение периодично, то его можно разложить в гармонический ряд и приложить все приведенные рассуждения к каждому из его членов. Таким образом, в общем случае несинусоидально-пульсирующего и несинусоидально-распределенного поля закон индуктирования трансформаторной ЭДС приобретает значительную сложность. Эта сложность усугубляется еще тем, что при наличии насыщения стали сердечника закон изменения индукции во времени в различных частях сердечника будет разным. Действительно, пусть, например, МДС, создающая данный пульсирующий магнитный поток, изменяется во времени синусоидально и синусоидально же распределена по полюсному делению; тогда индукция в каждой точке зазора в каждый момент времени будет определяться мгновенным местным значением МДС и магнитным сопротивлением контура, по которому эта МДС действует. Последнее состоит из сопротивления зазора, постоянного, если зазор равномерен, и сопротивлений зубцов и тела якоря (не считая магнитного сопротивления сердечника индуктора), которые зависят от значений индукции сложным образом, потому что последние изменяются на протяжении контура от точки к точке.

Если к этому добавить, что зависимость удельной МДС от индукции не может быть выражена сколько-нибудь универсальным математическим уравнением, становится ясной сложность точного определения трансформаторной ЭДС, которое приходится заменять приближенным, вводят ряд более или менее приемлемых допущений.

3.11. МЕРЫ БОРЬБЫ С ВИХРЕВЫМИ ТОКАМИ В ОБМОТКАХ

До тех пор, пока обмотка якоря не нагружена током, как, например, при холостом ходе машины в режиме генератора, во всех проводниках каждого паза полем индуктора индуктируются вполне одинаковые ЭДС; на этом были основаны все приведенные в данной главе рассуждения. При нагрузке током обмотка якоря сама начинает создавать магнитное поле; одна его часть, подробному рассмотрению которой отведена следующая глава, взаимодействует в зазоре с полем индуктора, если таковое существует, как в машине постоянного тока или синхронной машине, или образует основу рабочего поля, если индуктора нет, как в асинхронной машине. В обоих случаях эта часть является в основном полезной, так как ею определяется получаемый от машины эффект; но некоторая ее доля, обусловленная комплектом гармонических, не только бесполезна, но и вредна, поскольку вызывает добавочные потери, главным образом электромагнитного характера.

Другая часть магнитного поля, создаваемого обмоткой при протекании по ней тока, замыкается по путям вне зазора машины и является полностью *полем рассеяния*. В свою очередь, ее можно разделить на две основные составляющие: поле поперек пазов якоря и поле в зоне лобовых частей. Обе они в известной степени полезны, так как в основном за их счет образуется индуктивное сопротивление обмотки якоря, ограничивающее токи при различных переходных процессах, как, например, при внезапном коротком замыкании; но они также и вредны, поскольку тоже ведут к возникновению добавочных потерь, и в первую очередь в самой обмотке.

На рис. 3.36 представлен в несколько упрощенном виде паз с обмоткой, по которой протекает ток; если в пазу имеется большое число проводников малого сечения, входящих в состав последовательно включенных витков, то токи во всех этих проводниках одинаковы и не различаются по фазе. Вокруг каждого из них возникает поле рассеяния, замыкающееся через паз над проводни-

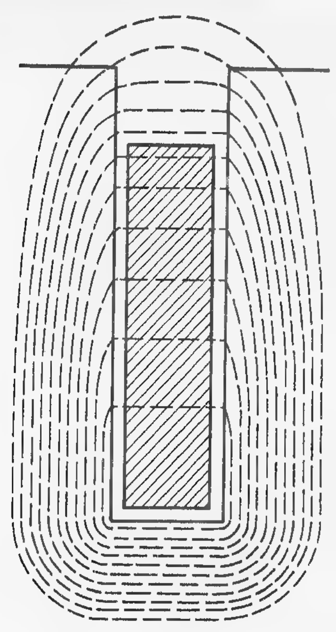


Рис. 3.36. Поле рассеяния внутри паза

ком, и затем по активной стали, окружающей этот паз. Если считать, что магнитное сопротивление стали исчезающе мало по сравнению с сопротивлением пути через паз, что достаточно близко к действительности, то индукция поля рассеяния должна возрастать линейно от дна паза к его отверстию; это поле индуктирует в проводниках ЭДС, также линейно возрастающие по высоте паза, следовательно, их индуктивные сопротивления неодинаковы — чем ниже лежит проводник в пазу, тем больше его сопротивление.

Пока действительное положение соответствует описанному, т. е. пока паз содержит много проводников малого сечения, все это не является вредным с точки зрения возникновения добавочных потерь; но положение изменяется при переходе к малому числу проводников более крупного сечения, в пределе — к стержневой обмотке, особенно однослойной, когда в пазу лежит только один проводник. Этот проводник можно представить сначала либо массивным, либо состоящим из пучка параллельных проводников малого сечения, электрически соединяющихся между собой только по выходе из паза. В обоих случаях индуктивное сопротивление нижних слоев, связанных с бо́льшим потоком рассеяния через паз, больше, чем верхних, вследствие чего ток вытесняется в верхние слои и его плотность возрастает от дна паза к отверстию. Это вызовет повышение тепловыделения в материале проводника в в верхних слоях и некоторое понижение его в нижних, однако в общем потери в проводнике возрастут, т. е. появятся *добавочные потери*. Здесь не место давать количественную оценку этого явления; достаточно лишь указать, что добавочные потери пропорциональны *квадратам* действующего значения и частоты тока и по крайней мере четвертой степени высоты сечения.

Описываемое явление стало известно на весьма ранних ступенях развития электромашиностроения, и, естественно, его нежелательность породила меры борьбы с ним. Простейшей из них является применение так называемой *литцы* — проводника, состоящего из большого числа проволок малого сечения, зачастую не имеющих какой-либо специальной изоляции помимо слоя оксида, получающегося при изготовлении проволоки. Эти проволоки скручиваются и опрессовываются в жгут прямоугольного сечения с закругленными углами, как на рис. 3.37, большей частью

изолированный хлопчатобумажной оплеткой. Обмотки из литцы встречаются и по настоящее время, главным образом в относительно небольших машинах повышенной частоты; благодаря гибкости литцы она очень легко укладывается в открытые пазы, а лобовые части формуются на подкладных шаблонах. Встречается также укладка в полузакрытые или закрытые пазы, производимая способом протяжки; в этом случае внутренняя поверхность пазовой гильзы должна быть гладкой и мало поддающейся истиранию. Наиболее благоприятной формой такой обмотки, особенно однофазного тока, является концентрическая с одновитковыми секциями.

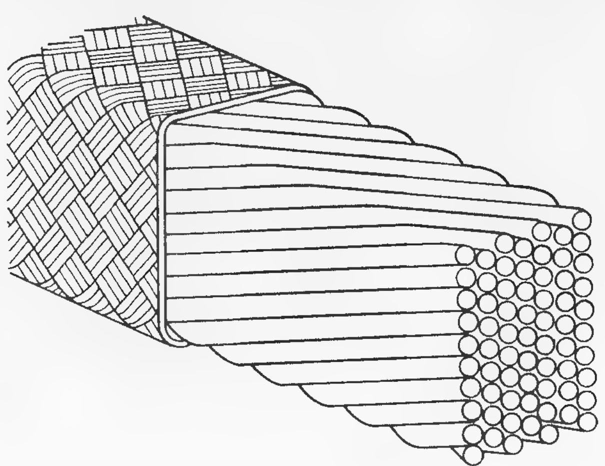


Рис. 3.37. Литца

Известны попытки применения проводников с подразделенным сечением в виде витого цилиндрического кабеля и в более крупных машинах — турбогенераторах; отдельные проволоки имели специальный профиль и покрывались тонкослойной изоляцией. Однако круглая форма сечения неблагоприятна в отношении использования объема машины, и потому сколько-нибудь широкого применения это не нашло.

На протяжении развития электромашиностроения предпринимались разнообразные попытки скручивания составных элементов прямоугольного сечения крупного проводника; так, например, в каждом элементе делались надрезы несколько больше, чем до половины ширины, в которых элементы перекрещивались (рис. 3.38). Хотя в местах надрезов плотность тока возрастает при этом более чем вдвое, дополнительно выделяющаяся в них теплота отводится за счет продольной теплопроводности проводников и температура в этих местах не поднимается сколько-нибудь существенно против общего уровня. Однако такая конструкция требует большой точности исполнения, малотехнологична и недостаточно хорошо удовлетворяет своему назначению.

В настоящее время практически повсеместное применение получила конструкция плетеных проводников, расположенных в пазу двумя столбиками. Каждый отдельный или, как его обычно называют (хотя и неправильно по существу), *элементарный проводник* прямоугольного сечения переходит с шагом t в верхней части сечения стержня из одного столбика в другой, спускается в нем до самого низа сечения и возвращается в первый столбик, в котором снова поднимается, как это изображено на рис. 3.39. Такое переплетение носит название *транспозиции* элементарных проводников, а выполненные с ним стержни — *стержней Ребеля* по имени их изобретателя.

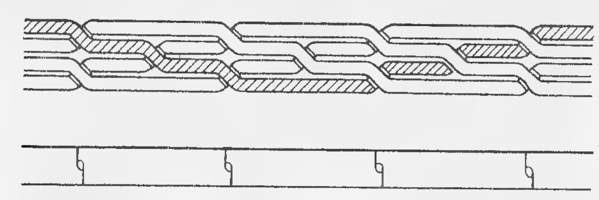


Рис. 3.38. Переплетение элементарных проводников с надрезами

Если элементарный проводник начиная от какого-либо края паза на всем его протяжении перейдет из самого верхнего положения в самое нижнее или наоборот, это может быть названо транспозицией на 180°; фазы дополнительных токов в самом верхнем и в самом нижнем проводниках при отсутствии транспозиции были

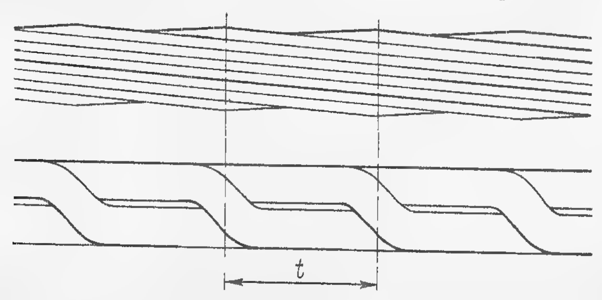


Рис. 3.39. Переплетение элементарных проводников в стержне Ребеля

бы противоположны. Сечение такого проводника занимает в пазу постепенно все возможные положения, и потому ЭДС, индуктируемая потоком рассеяния через паз, будет иметь в нем среднее значение по всему стержню. Если бы все остальные проводники тоже имели возможность занимать все возможные положения внутри паза, то и ЭДС в них были бы одинаковы и равны этому же среднему значению. Однако из рис. 3.40, *а* видно, что проводник, лежащий у края паза в середине высоты сечения стержня и затем поднимающийся по сечению кверху, будет занимать только положения выше середины сечения, а проводник, опускающийся книзу, — только положения ниже середины, и потому ЭДС в них не будут одинаковы и равны некоторой средней. Следовательно, транспозиция на 180° не достигает цели; поэтому она не заслуживает применения.

Полное выравнивание ЭДС в пределах паза дает транспозиция на 360°, при которой сечение каждого элементарного проводника занимает все возможные положения, как это можно видеть на рис. 3.40, *б*; она имеет повсеместное применение, однако тоже не лишена недостатков. Если бы все элементарные проводники электрически соединялись при выходе из паза, как это действительно практиковалось в обмотках с отдельными лобовыми частями на первых этапах применения транспозиции, то ЭДС во

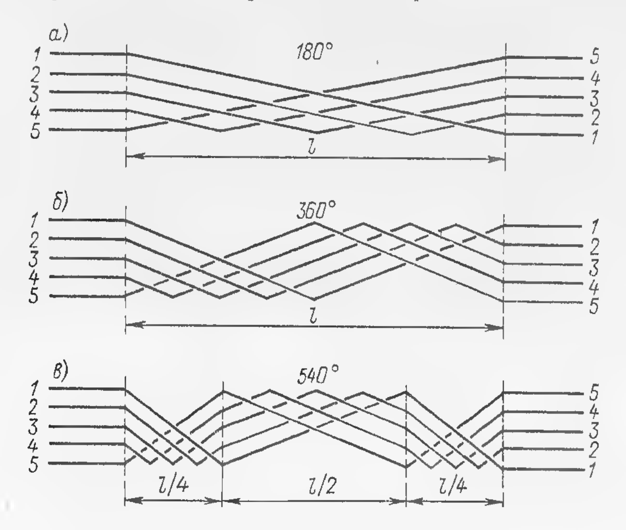


Рис. 3.40. Транспозиция элементарных проводников: *а* — на 180°; *б* — на 360°; *в* — на 540°

всех элементарных проводниках были бы практически одинаковы; но в обмотках современной конструкции стержни составляют одно целое с лобовыми частями и электрическое соединение элементарных проводников происходит только в головках секций. При транспозиции на 360° проводники расположены в лобовых частях в одном и том же порядке по обе стороны машины; однако в этих частях тоже существуют поля рассеяния, образуемые совместным действием токов в обмотках обеих частей машины и различным образом связанные с разными проводниками в зависимости от их положения. Возникающая при этом разность ЭДС в обеих лобовых частях имеет одно и то же направление и заметно нарушает результат, достигнутый транспозицией, порождая циркуляционные токи в контурах, образуемых элементарными проводниками.

От этого недостатка в значительной степени свободна транспозиция в пазовой части на 540°. Она достигается разделением пазовой части на три участка с транспозицией по 180°; если при этом длина каждого из крайних участков вдвое меньше длины среднего, как показано на рис. 3.40, *в*, то каждый элементарный проводник будет занимать в стержне все возможные положения на одной и той же длине; таким образом, транспозиция на 540° соединяет преимущества транспозиций на 180° и 360°.

Основной областью применения транспозиции на 540° являются крупные турбогенераторы, у которых пазовая часть имеет длину, достаточную для размещения переплетения на 540°. Напротив, гидрогенераторы, даже наиболее крупные, редко имеют длину пазовой части, достаточную для этой цели; кроме того, лобовые части волновых обмоток по разные стороны машины имеют неодинаковую длину, что лишает транспозицию на 540° ее основного смысла. Таким образом, для них основной формой является транспозиция на 360°.

Дальнейшее усовершенствование представляет транспозиция элементарных проводников в лобовых частях по 180° в каждой, в результате чего в довольно высокой степени выравнивается неодинаковость индуктирования ЭДС полями рассеяния в торцевых зонах машины. Поскольку в турбогенераторах, даже крупных, длина лобовых частей по сравнению с пазовой относительно невелика, для применения транспозиции в них иногда весь пучок элементарных проводников подразделяется на две половины с транспозицией в пределах каждой на 360°.

В гидрогенераторах длина лобовых частей большей частью бывает недостаточной для применения транспозиции в них и потому от нее приходится отказываться; впрочем, поля рассеяния в торцевых зонах гидрогенераторов, имеющих менее сконцентрированные лобовые части, значительно менее интенсивны, чем в турбогенераторах.

Необходимо отметить, что стержни с транспозицией на 360° складываются очень просто из двух половин; но при транспозиции на 540° их приходится перевивать поочередными поворотами, так как каждый элементарный проводник имеет по три перегиба. Еще более осложняется сборка стержней при транспозиции также и в лобовых частях, поскольку число перегибов еще более возрастает.

Периодически повторяющиеся перегибы элементарных проводников делают верхнюю и нижнюю поверхности стержня неровными; это заставляет выравнивать их перед наложением корпусной изоляции посредством прокладок из достаточно твердого материала. Такие неровности становятся особенно значительными при непосредственном жидкостном охлаждении обмотки, когда полые элементарные проводники чередуются с несколькими сплошными, имеющими значительно меньшую высоту сечения. Одним из средств выравнивания является перегибание одновременно двух сплошных проводников, для чего, очевидно, их число между двумя полыми проводниками должно быть четно; но это ухудшает выравнивание дополнительных ЭДС и потому применяется главным образом на участках, где разность высот сечений особенно нежелательна.

По условиям теплосъема обычно не требуется, чтобы доля полых проводников в стержне была велика; она может быть тем меньшей, чем лучше опрессован стержень по высоте, что способствует улучшению теплопередачи от сплошных проводников к полым. Поэтому между каждыми двумя полыми проводниками помещается 3—4 сплошных, а при очень хорошем качестве опрессовки их число может быть доведено до 6 и даже 8.

В двухслойных обмотках наиболее крупных машин с большой осевой длиной нередко применяется неодинаковое число элементарных проводников в стержнях верхнего и нижнего слоев. Так как добавочные потери в верхнем стержне значительно больше, чем в нижнем, то для выравнивания суммы основных и добавочных потерь, а вместе с ней температуры и, что особенно важно, удлинения стержней число элементарных проводников в верхнем стержне берется бо́льшим, чем в нижнем; эта разность может доходить примерно до 15 %, а соотношение чисел полых и сплошных проводников остается одним и тем же.

Глава четвертая

МАГНИТОДВИЖУЩАЯ СИЛА ОБМОТКИ

4.1. МДС ВИТКА ИЛИ КАТУШКИ

Задача определения ЭДС, индуктированной в обмотке внешним по отношению к ней магнитным полем, не изменяющимся во времени, но движущимся относительно обмотки с неизменной скоростью, сводилась к переходу от пространственного распределения этого поля к изменению ЭДС во времени; задача определения МДС обмотки обратная — переход от изменения тока в обмотке во времени к пространственному распределению создаваемого им магнитного поля. По этой причине между решениями обеих задач есть много общего, но существует и ряд различий, определяемых их физической сущностью, а в известной степени и удобствами оперирования. Первое различие можно усмотреть в том, что если не представляло никаких затруднений рассматривать ЭДС в одном-единственном проводнике на поверхности якоря, не задаваясь вопросом, как этот проводник соединяется с другими проводниками обмотки, то было бы чрезвычайно неудобно рассматривать МДС, создаваемую одиночным проводником, когда в нем имеется тот или иной ток.

Неодинаково решение задач и в отношении участвующих в них физических величин. В задаче определения ЭДС не рассматривался вопрос о происхождении магнитного поля; его индукция с законом ее распределения принималась как заданная. Но теория обмоток вынуждена ограничиваться только определением МДС, поскольку переход от последней к индукции представляет задачу расчета электрической машины в целом, выходящую за пределы теории обмоток.

Пусть на внутреннюю поверхность якоря наложен один виток, стороны которого расположены вдоль образующих этой поверхности по концам какого-либо ее диаметра (рис. 4.1), и пусть противоположная часть машины имеет вид магнитопроводного цилиндра, строго концентричного с внутренней поверхностью якоря,

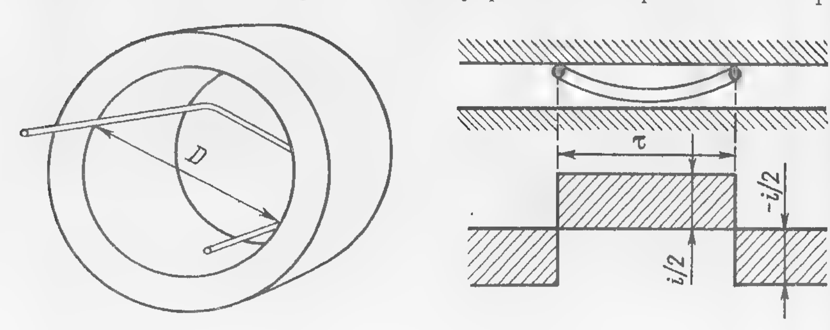


Рис. 4.1. Диаметральный виток на поверхности якоря

Рис. 4.2. МДС диаметрального витка

так что зазор между ними всюду одинаков. Если считать, кроме того, что проводник, из которого изготовлен виток, бесконечно тонок, то графиком распределения МДС по поверхности якоря будет прямая линия, отстоящая от оси абсцисс на $\pm i/2$, где i — значение тока в проводнике в рассматриваемый момент времени, так что разность ординат графика в пределах витка и вне его численно равна току в проводнике (рис. 4.2).

Если в левом проводнике витка ток направлен от зрителя за плоскость графика, а в правом — из-за этой плоскости на зрителя, то на поверхности якоря, обращенной к противоположной части машины, согласно правилам определения полярности поля, создаваемого током, будет северная полярность; в пределах витка ординаты графика будут считаться положительными, а вне их — отрицательными.

На рис. 4.3 представлено, как будет выглядеть распределение индукции в зазоре, создаваемой МДС в данном простейшем случае, в предположении, что линии поля в зазоре перпендикулярны к поверхностям обеих частей машины на всем своем протяжении. Это предположение тем ближе к действительности, чем меньше зазор по сравнению с полюсным делением; при данном условии закон распределения индукции на поверхностях обеих частей машины будет одинаков.

В любом замкнутом магнитном контуре такого поля действует одна и та же МДС, но сопротивления этих контуров различны; они состоят из двукратного сопротивления зазора, одинакового для всех контуров, и сопротивлений ферромагнитных участков — тела якоря и тела противоположной части машины, которые для каждого контура различны. Если бы эти последние были исчезающе малы по сравнению с сопротивлением зазора, то график распределения индукции в зазоре имел бы тот же самый вид, что и график МДС, т. е. такие же прямоугольники, как на рис. 4.2; но при всякой конечной магнитной проводимости материалов этих участков их сопротивления тем больше, чем длиннее периметр контура. Поэтому индукция в середине каждого полюсного деления как в пределах витка, так и вне его должна быть меньшей, чем

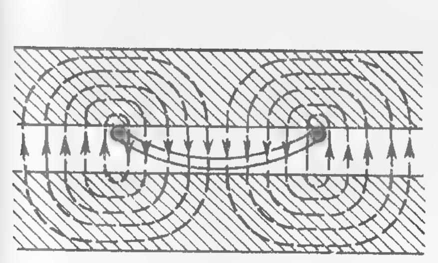


Рис. 4.3. Индукция в зазоре, созданная током в витке (см. рис. 4.1), при ряде упрощающих предположений

Рис. 4.4. Искривление линий индукции в зазоре

непосредственно около проводников; нет способа точного аналитического учета такого различия, поскольку оно определяется характеристиками намагничивания материалов, из которых изготовлены обе части машины. Предположения, что обе части изготовлены из одного и того же материала, что поперечные сечения обеих частей подобраны так, чтобы сопротивления участков в них были одинаковы и т. д., не облегчают решение задачи, определяемое фактором, внешним по отношению к устройству обмотки и оказывающим влияние, от него не зависящее.

Далее можно усложнить задачу тем, что контуры, ближайшие к проводникам, замыкаются в зазоре по криволинейным путям, не заходящим в противоположную часть машины, как показано на рис. 4.4; поэтому графики распределения индукции на поверхностях частей машины становятся различными, по крайней мере поблизости от проводников, и это различие тем сильнее, чем больше зазор. Наконец, реальные проводники имеют конечные размеры и большей частью лежат не на гладкой цилиндрической поверхности, а в пазах, прерывающих эту поверхность, что еще более усложняет определение сопротивлений контуров.

С другой стороны, эволюция машин переменного тока начиналась преимущественно с конструкций, имеющих полузакрытые пазы с относительно очень узкими отверстиями или даже вполне закрытые, что позволяло с достаточной для практических целей точностью пренебрегать действительными размерами проводников; а при низких насыщениях ферромагнитных участков контуров влияние их сопротивлений на распределение индукции незначительно, так как эти сопротивления малы по сравнению с сопротивлением зазора. Но главное состоит в том, что наибольший интерес представляют магнитные поля, создаваемые не только одной обмоткой якоря, но и деталями на противоположной части машины,

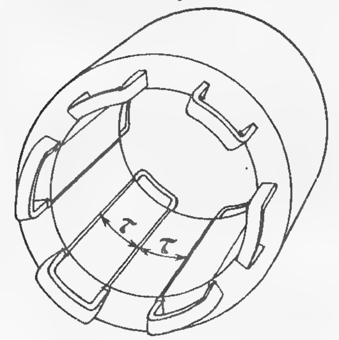


Рис. 4.5. Обмотка из нескольких витков или катушек

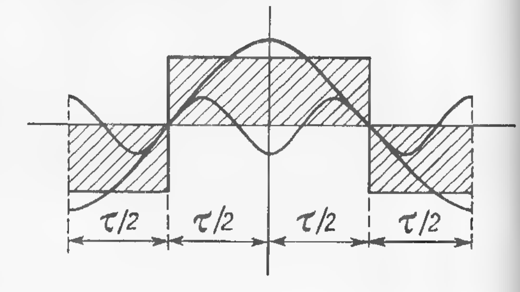


Рис. 4.6. График МДС при диаметральном шаге

также создающими свои МДС. В результате реальное поле в зазоре образуется совместным действием МДС обеих частей; следовательно, необходимо сначала рассмотреть каждое из них в отдельности, после чего пытаться определить результат их взаимодействия и только затем переходить к распределению индукции, что уже не представляет задачу теории обмоток.

Можно расположить на поверхности якоря не один диаметральный виток, а p витков или катушек из s витков в каждой с шириной τ и отстоящих друг от друга на то же расстояние τ (рис. 4.5). График распределения МДС будет состоять из равных прямоугольников, попеременно отложенных в положительном и отрицательном направлениях от оси абсцисс, и не иметь ни начала, ни конца; как всякую периодическую кривую его можно разложить в гармонический ряд

$$f(x) = \sum_{\nu=0}^{\infty} \left[a_\nu \cos \frac{\nu \pi x}{\tau} + b_\nu \sin \frac{\nu \pi x}{\tau} \right],$$

где x — линейная координата, откладываемая вдоль окружности, и ν — порядок гармонической.

Характер разложения зависит от выбора начала координат; всего удобнее расположить последнее в середине одного из отрез-

ков τ, например того, на котором ординаты графика положительны. Тогда по причине симметричности графика по отношению к оси ординат коэффициента b_ν всех членов разложения с синусами обратятся в нули и останутся только члены с косинусами. Общий вид коэффициента a_ν этого разложения будет

$$a_\nu = \frac{1}{\tau} \int_{-\tau}^{+\tau} f(x) \cos \frac{\nu \pi x}{\tau} dx. \qquad (4.1)$$

Здесь, как это можно видеть на рис. 4.6,

$f(x) = -is/2$ в пределах от $x = -\tau$ до $x = -\tau/2$;
$f(x) = +is/2$ » » от $x = -\tau/2$ до $x = +\tau/2$;
$f(x) = -is/2$ » » от $x = +\tau/2$ до $x = +\tau$.

Интегрирование выражения (4.1) в неопределенном виде дает

$$\int f(x) \cos \frac{\nu \pi x}{\tau} dx = \mp \frac{is}{2} \frac{\tau}{\nu \pi} \sin \frac{\nu \pi x}{\tau} + C.$$

При значениях аргумента $x = \mp\tau/2$ для $\nu = 1, 5, 9, \ldots$

$$\sin \frac{\nu \pi x}{\tau} = +1$$

и для $\nu = 3, 7, 11, \ldots$

$$\sin \frac{\nu \pi x}{\tau} = -1;$$

при $x = \mp\tau$ для всех нечетных значений ν

$$\sin \frac{\nu \pi x}{\tau} = 0;$$

что касается четных, то для них при всех данных пределах интегрирования

$$\sin \frac{\nu \pi x}{\tau} = 0.$$

Таким образом, абсолютное значение суммы синусов при всех пределах интегрирования равно 4, следовательно, разложение имеет общий вид

$$f(x) = \frac{1}{\tau} \frac{is}{2} 4 \sum_{\nu=1}^{\infty} \pm \frac{\tau}{\nu \pi} \cos \frac{\nu \pi x}{\tau} = \frac{2is}{\pi} \sum_{\nu=1}^{\infty} \pm \frac{1}{\nu} \cos \frac{\nu \pi x}{\tau}. \qquad (4.2)$$

Здесь ν имеет только нечетные значения, а знаки поочередно чередуются: плюс при $\nu = 1, 5, 9, 13, \ldots$ и минус при $\nu = 3, 7, 11$.

Заслуживает упоминания, что амплитуда основной волны разложения, равная $2is/\pi$, превосходит в $4/\pi$ раз высоту прямоугольников графика, равную $is/2$.

В итоге разложение графика МДС прямоугольной формы с одинаковыми длинами положительных и отрицательных участков

дает сумму бесконечного числа гармонических нечетных порядков, амплитуды которых убывают обратно пропорционально этим порядкам, а взаимное расположение их таково, что в серединах прямоугольников они попеременно положительны и отрицательны; это значит, что на границах прямоугольников все гармонические проходят через нулевые значения в одном и том же направлении. На рис. 4.7 представлены результаты последовательного суммирования ординат таких составляющих; отчетливо видно, как эти результаты постепенно приближаются к прямоугольной форме.

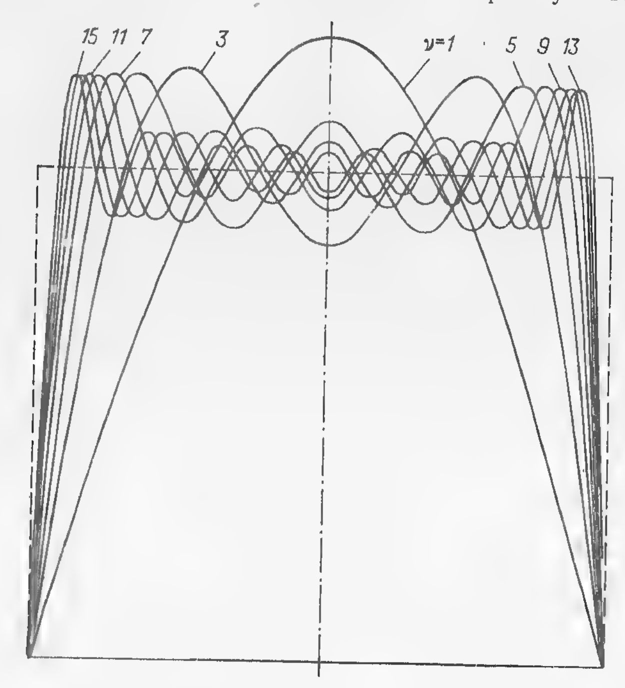


Рис. 4.7. Последовательное суммирование гармонических нечетных порядков

Площадь прямоугольного графика, равная $is\tau/2$, состоит из сумм площадей полуволн всех гармонических, взятых по одному разу. Действительно, если все гармонические пересекают ось абсцисс вместе с основной волной и в том же направлении, то от каждой из них в эту сумму войдет только одна полуволна, потому что остальные поровну положительны и отрицательны и взаимно компенсируются. Если амплитуды всех гармонических обратно пропорциональны их порядкам и равны $2is/(\nu\pi)$, то площади их полуволн обратно пропорциональны квадратам порядков; следовательно, площадь прямоугольника должна быть равна

$$\sum \frac{2is}{\nu\pi}\,\frac{\tau}{\nu}\,\frac{2}{\pi} = \frac{4is\tau}{\pi^2}\sum\frac{1}{\nu^2};$$

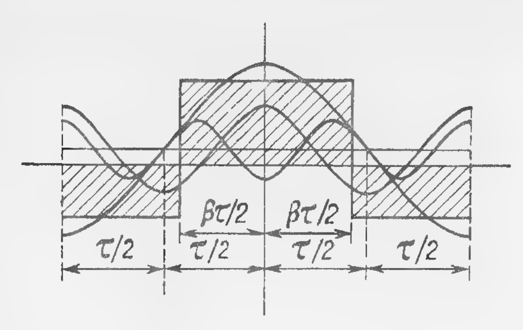


Рис. 4.8. Определение ординат графика МДС при укорочении шага

но сумма бесконечного ряда величин, обратных квадратам всех нечетных чисел, равна $\pi^2/8$; подстановка этого значения как раз дает указанное выше значение площади прямоугольного графика $is\tau/2$.

Если теперь укоротить шаг витков или катушек так, что их ширина станет равной $\beta\tau$, а промежутки между ними — соответственно $(2 - \beta\tau)$ (рис. 4.8), то график МДС превратится в последовательность прямоугольников неодинаковой длины. Разность положительных и отрицательных ординат, как и в предыдущем случае, останется равной току i, питающему такую обмотку, или произведению is, но сами ординаты должны измениться.

Заранее можно сказать, что здесь в разложении должны содержаться гармонические не только нечетных, но и четных порядков, в том числе член нулевого порядка, т. е. постоянная составляющая a_0.

Устранение этой последней достигается соответствующим выбором соотношения ординат графика МДС в пределах витка или катушки и вне их, но критериев для этого выбора пока еще нет и остается считать, что абсолютные значения ординат одинаковы и равны $is/2$.

Общий вид коэффициентов разложения останется прежним, если начало координат поместить в середину ширины витка или катушки, как на рис. 4.8; он действителен и для члена a_0, если в выражение (4.1) ввести множитель 1/2. Но задание функции $f(x)$ будет иным:

$f(x) = -is/2$ в пределах от $x = -\tau$ до $x = -\beta\tau/2$;
$f(x) = +is/2$ » » от $x = -\beta\tau/2$ до $x = +\beta\tau/2$;
$f(x) = -is/2$ » » от $x = +\beta\tau/2$ до $x = +\tau$.

Соответственно этому при значениях аргумента $x = \mp\tau$, как и прежде, для всех значений ν

$$\sin\frac{\nu\pi x}{\tau} = 0;$$

но при значениях аргумента $x = \mp\beta\tau/2$ величина

$$\sin\frac{\nu\pi x}{\tau} = \mp\sin\frac{\nu\beta\pi}{2},$$

т. е. является не чем иным, как коэффициентом укорочения шага $k_{y\nu}$.

Для гармонических четных порядков, не кратных четырем, и укорочений β, близким к единице, при обоих этих пределах значения синуса имеют тот же знак, что и для основной волны, а для гармонических с порядками, кратными четырем, — противоположный. Таким образом, знаки при членах разложения попарно чередуются — для членов четных порядков одинаковы со знаками предшествующих им членов нечетных порядков; не представляет исключения из этого и член нулевого порядка a_0, поскольку нуль считается числом четным. Действительно, при выбранном выше распределении ординат между положительным и отрицательным значениями он равен

$$a_0 = \frac{1}{2\tau}\int_{-\tau}^{+\tau} f(x)\,dx = \frac{is}{4\tau}\int_{-\tau}^{+\tau} dx = -\frac{is}{2}(1-\beta).$$

Он будет отсутствовать в разложении, если ординату графика МДС в пределах витка или катушки принять равной

$$\frac{is}{2} + \frac{is}{2}(1-\beta) = is\left(1 - \frac{\beta}{2}\right),$$

а вне этих пределов

$$\frac{is}{2} - \frac{is}{2}(1-\beta) = is\frac{\beta}{2}.$$

Это значит, что ординаты графика должны быть выбраны так, чтобы ограничиваемые им положительные и отрицательные площадки были одинаковы. Таким образом, разложение приобретает вид, отличающийся от (4.2) только введением коэффициентов укорочения шага:

$$f(x) = \frac{2is}{\pi}\sum_{\nu=1}^{\infty} \pm \frac{k_{y\nu}}{\nu}\cos\frac{\nu\pi x}{\tau}. \qquad (4.3)$$

Здесь ν имеет как нечетные, так и четные значения, а знаки чередуются попарно: плюс при $\nu = 1, 2, 5, 6, 9, 10, \ldots$ и минус при $\nu = 3, 4, 7, 8, 11, 12, \ldots$ Не следует упускать из вида, что при любом значении укорочения шага β с увеличением ν коэффициенты укорочения шага $k_{y\nu}$ рано или поздно станут отрицательными и изменения их знаков в дальнейшем будут происходить периодически.

Знаки при членах разложения имеют значение для формальной правильности оперирования уравнениями МДС, но не отражаются на работе машины. Действительно, изменение знака при любом члене на обратный вносит лишь изменение фазы данной гармонической на половине ее периода; однако существенным является само наличие данной гармонической с ее амплитудой в кривой МДС обмотки, от которого зависит производимое ею действие, полезное или вредное для машины. Тем не менее во всех дальнейших выводах правильность знаков соблюдается.

4.2. МДС ОБМОТКИ ОДНОФАЗНОГО ТОКА

Выводы предыдущего параграфа могут быть приложены к определению МДС обмотки, состоящей из ряда секций, уложенных в пазы зубчатого якоря, в известной степени аналогично тому, как выводы в отношении ЭДС, индуктированной в витке, были распространены затем на целые обмотки.

Однако при этом будут и определенные различия. Так, на индуктирование ЭДС влияет способ соединения отдельных частей обмотки между собой; одна и та же обмотка может обладать различными свойствами в отношении гармонических четных порядков при соединении в параллельные ветви или последовательном, причем при одном и том же числе параллельных ветвей — в зависимости от выбора последовательно соединенных групп секций.

В отношении МДС все это отпадает, если принять одно-единственное допущение, что вне зависимости от способа соединения обмотки токи во всех ее секциях одинаковы по амплитуде и фазе. Такое допущение справедливо в большинстве практических случаев и потому может быть положено в основу рассмотрения МДС обмоток всех видов.

Это рассмотрение может быть начато с обмотки, имеющей на каждом полюсном делении q диаметральных секций, заложенных в лежащие рядом пазы. Каждая из этих секций создает МДС, рассмотренную в предыдущем параграфе; следовательно, их совместным действием будет образование МДС, график распределения которой может быть получен суммированием q одинаковых графиков, смещенных в пространстве последовательно на углы α. Совершенно так же будут суммироваться и все гармонические составляющие этих графиков; следует только не забывать, что для всякой гармонической порядка ν смещение будет представляться в ν раз бо́льшим, т. е. равным $\nu\alpha$.

Но такое суммирование составляющих МДС в пространстве формально не отличается от суммирования составляющих ЭДС во времени, следовательно, подчиняется той же системе коэффициентов распределения. Различие состоит только в том, что содержание гармонических составляющих различных порядков в кривой ЭДС зависит как от коэффициентов распределения, так и от состава кривой распределения индукции, т. е. от фактора, не зависящего от обмотки; между тем содержание гармонических в графике МДС полностью определяется свойствами обмотки, в первую очередь тем, что их амплитуды при прочих равных условиях обратно пропорциональны порядкам. Под прочими равными условиями надо понимать равенство абсолютных значений коэффициентов распределения, как, например, для основной волны и гармонических зубцовых порядков.

На рис. 4.9 представлено суммирование графиков МДС диаметральных секций для нечетного и четного чисел q. В обоих случаях наибольшая ордината графика в $q/2$ раз больше ординаты графика МДС одной секции и эту ординату

график имеет на протяжении обоих не заполненных обмоткой участков — как в пределах группы секций, так и в промежутке между ними. Характерным для графика при четных числах q является наличие промежутков между поверхностями, на которых МДС равна нулю; при нечетных числах q таких промежутков нет, так что изменение полярности намагничивания происходит при переходе через пазы, средние в группах.

На этом рисунке выделена основная волна и отдельно в виде зачерненных площадок представлены разности между ступенчатыми графиками и ею, имеющие пилообразный вид; они представляют всю сумму высших гармонических, в которой особенно отчетливо выделяется биение гармонических зубцовых порядков первой серии. Именно они, обладая такими же коэффициентами распределения, как и основная волна, в целом создают форму этих разностей.

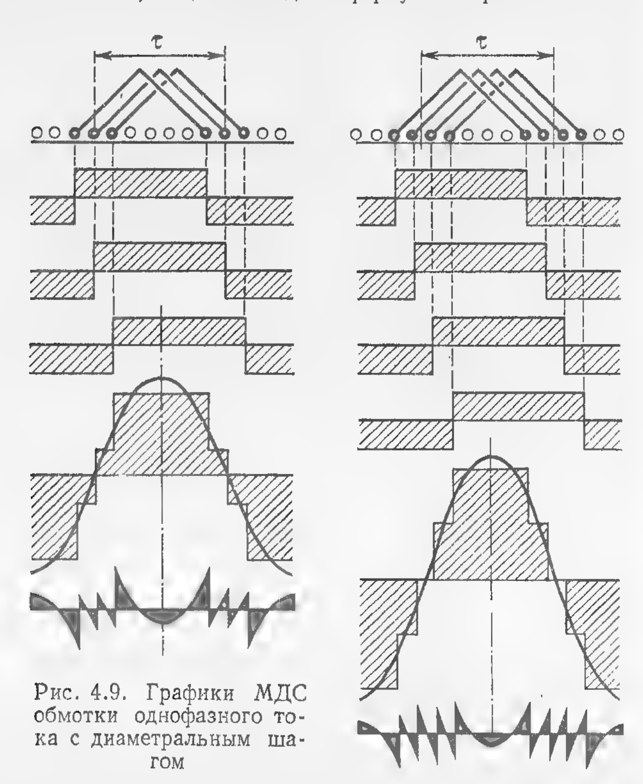


Рис. 4.9. Графики МДС обмотки однофазного тока с диаметральным шагом

Для сравнения на рис. 4.10 дан пример биения гармонических порядков 17 и 19, которые являются зубцовыми порядками первой серии для обмоток трехфазного тока с тремя пазами на полюс и фазу; сходство такого биения с пилообразной разностью еще более увеличится, если на него наложить биение зубцовых гармонических второй серии, в данном случае порядков 37 и 39.

В графиках МДС отдельных витков, приведенных в предыдущем параграфе, примечательно то, что амплитуда основной волны заметно превосходит ординату графика — в отношении $4/\pi =$ $= 1{,}2732$; в графиках МДС рассматриваемых обмоток это соотношение уже несколько меньше — числитель дроби умножается на коэффициент распределения, меньший единицы. Как бы ни

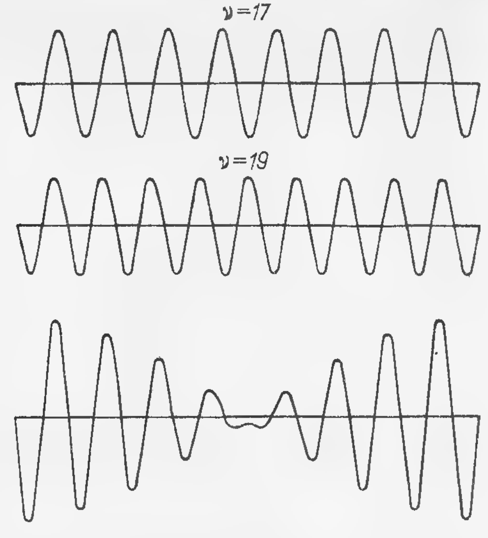


Рис. 4.10. Биение гармонических двух близких друг к другу порядков

искажалась форма кривой распределения индукции, соответствующей данной МДС, под влиянием насыщения магнитных материалов машины, это обстоятельство все же будет в ней присутствовать. В результате для получения заданного значения амплитуды основной волны требуется меньшая МДС, нежели можно было бы предположить сообразно такому значению; это в очень малой степени касается обмоток многофазного тока, но полностью относится к обмоткам возбуждения неявнополюсных индукторов, которые по своему устройству не отличаются от обмоток однофазного тока.

Теперь следует рассмотреть обмотки, состоящие из секций с укороченным шагом (рис. 4.11). Здесь сразу обращает на себя внимание, что графики МДС имеют разную форму положительных и отрицательных площадок; наибольшая ордината первых стала большей, чем амплитуда основной волны, а вторых — наоборот, меньшей. Сильно возросла разность между ординатами суммарного графика МДС и основной волны, и она тоже имеет различную форму у положительных и отрицательных площадок; все это свидетельствует о значительном содержании гармонических четных порядков, внесенных укорочением шага. Однако одно обстоятельство все же сохранилось: обе площадки продолжают оставаться симметричными относительно осей, проходящих через их середины; следовательно, в этих местах, а значит, и на границах полюсных делений расположены вершины всех гармонических четных порядков, положительные или отрицательные.

Формы однослойных обмоток по рис. 4.9 и 4.11 являются устаревшими и в современных машинах практически не встречаются. Исключение представляют только обмотки возбуждения неявнополюсных индукторов, обычно выполняемые концентрическими секциями вразвалку, которые могут быть приведены к формам, показанным на рис. 4.9; что касается обмоток якорей, то для них характерно исполнение в равносекционной модификации с чередующимися группами секций, как, например, на рис. 4.12.

При нечетных числах пазов на полюс и фазу график МДС такой обмотки продолжает отличаться разной формой положительных и отрицательных площадок, но уже в меньшей степени, чем это было выражено на рис. 4.11. Соответственно меньшими стали разности между наибольшими ординатами этих площадок и амплитудой основной волны, а вместе с тем и разность между суммарным графиком МДС и основной волной; это показывает, что содержание гармонических четных порядков понизилось. Но при четных числах пазов на полюс и фазу, несмотря на резкую разницу в ординатах графиков МДС отдельных секций, положительные и отрицательные площадки графика МДС всей обмотки вполне одинаковы, следовательно, гармонические четных порядков в них отсутствуют.

Причина этого состоит в том, что такая обмотка может быть приведена к диаметральным секциям вне зависимости от того, в каком соединении находятся группы ее секций фактически. При нечетных числах пазов на полюс и фазу и укороченном шаге это было бы невозможно, и потому гармонические четных порядков в графике МДС неустранимы.

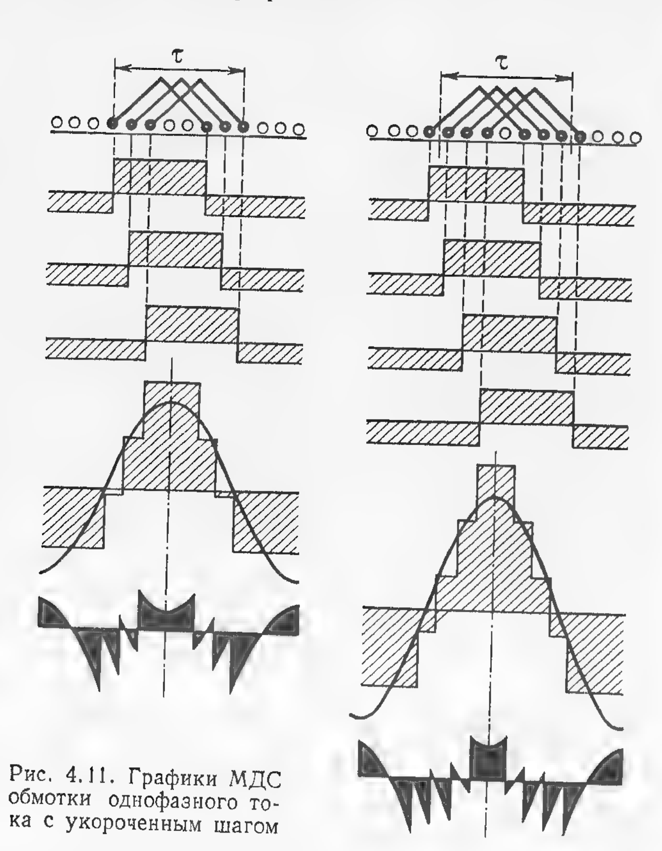


Рис. 4.11. Графики МДС обмотки однофазного тока с укороченным шагом

Раньше уже было показано, что двухслойные обмотки с любыми целыми числами пазов на полюс и фазу и при любых укорочениях шага могут быть приведены к диаметральным секциям; в отношении индуктирования ЭДС это сопровождалось условием последовательного соединения четного числа групп секций, поровну находящихся на полюсных делениях нечетной и четной нумерации, но здесь это условие становится излишним. Таким образом, двухслойные обмотки независимо от укорочения шага не содержат гармонических МДС четных порядков.

На рис. 4.13 дан пример построения графика МДС для двухслойной обмотки с укороченным шагом в двух случаях: когда укорочение настолько умеренно, что еще существуют пазы, содержащие по две стороны секций данной фазы в каждом, и когда

оно настолько сильно, что таких пазов не остается. Для сопоставимости данных графиков с предыдущими ординаты МДС каждой секции должны быть представлены вдвое меньшими, поскольку они соответствуют половинным заполнениям пазов; однако это сделало бы их недостаточно разборчивыми, и потому масштаб взят вдвое бо́льшим. Характерным для первого случая является наличие ступеней разной высоты; во втором все ступени одинаковы, но зато появляются участки, на которых нет ступеней. Несмотря

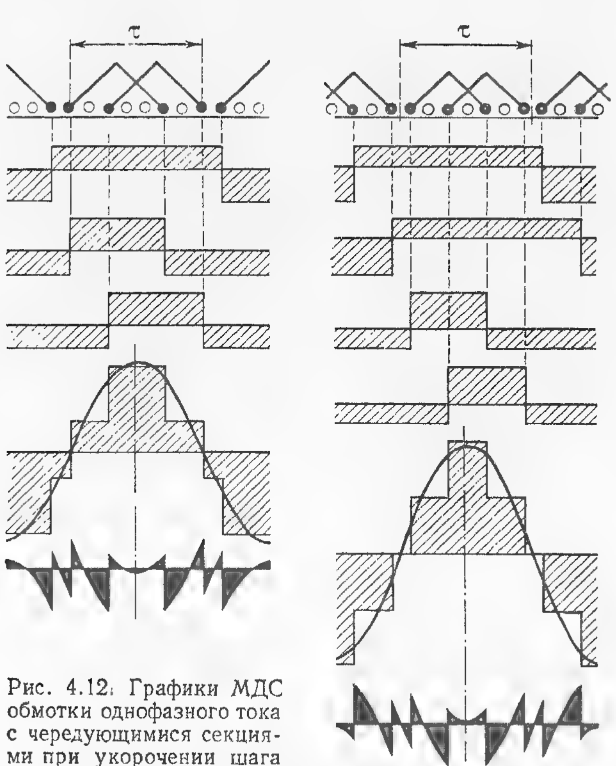


Рис. 4.12. Графики МДС обмотки однофазного тока с чередующимися секциями при укорочении шага

на значительное содержание постоянных составляющих в графиках МДС отдельных секций, в суммарных графиках они отсутствуют; положительные и отрицательные площадки вполне одинаковы и симметричны.

После всего изложенного не составляет затруднений написать общий вид разложения графика МДС; он будет отличаться от (4.3) тем, что к каждому слагаемому приписан множителем коэффициент распределения для гармонической данного порядка, а вся сумма их умножена на число секций q:

$$f(x) = \frac{2isq}{\pi} \sum_{\nu=1}^{\infty} \pm \frac{k_{q\nu} k_{y\nu}}{\nu} \cos \frac{\nu \pi x}{\tau}. \qquad (4.4)$$

При диаметральном шаге секций все составляющие четных порядков отпадают, так как коэффициенты укорочения шага для них обращаются в нули. При пользовании этим выражением следует помнить, что в случае однослойных обмоток с укорочением шага при четных числах q коэффициенты распределения нужно брать для половинного числа пазов $q/2$.

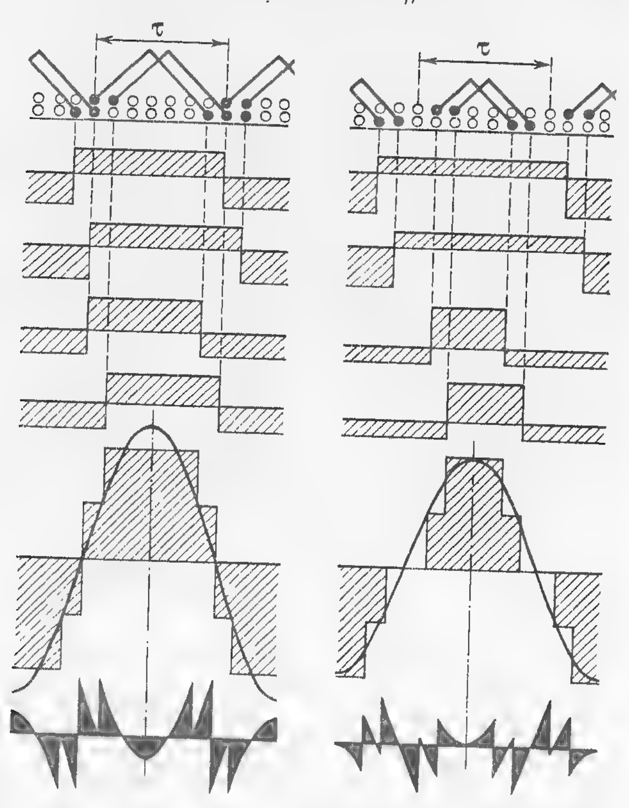


Рис. 4.13. Графики МДС двухслойной обмотки однофазного тока при различных укорочениях шага

Чем больше число q, тем больше ступеней имеет суммарный график МДС. В пределе вместо ступенчатой формы график превращается в ломаную линию, составленную из наклонных и горизонтальных отрезков прямых. Это представлено на рис. 4.14 для диаметральных секций и секций с укороченным шагом при условии, что участки, заполненные обмоткой, одинаковы. Наклон боковых сторон площадок в обоих случаях один и тот же, но если в первом из них положительные и отрицательные площадки совпадают по форме, то во втором они различны и имеют разные наибольшие ординаты, находящиеся в том же отношении, как и на рис. 4.8, 4.11 и 4.12 (слева); однако площади их все же равны, как и во всех предыдущих случаях. Разности между суммарными графиками МДС и их основными волнами резко различны: при диаметральном шаге эти разности намного меньше, чем при укороченном.

Выражение (4.4) может быть приспособлено к распределенным обмоткам, если вместо произведения тока i на число витков в секции s и на число пазов q подставить произведение тока на общее число витков в данной группе w. Кроме того, вместо символов коэффициентов распределения и укорочения шага целесообразно подставить их значения:

$$k_{q\nu} = \frac{2}{\nu\gamma\pi}\sin\frac{\nu\gamma\pi}{2}; \qquad k_{y\nu} = \sin\frac{\nu\beta\pi}{2}.$$

После всего этого разложение примет вид

$$f(x) = \frac{4iw}{\gamma\pi^2}\sum_{\nu=1}^{\infty}\pm\frac{1}{\nu^2}\sin\frac{\nu\gamma\pi}{2}\sin\frac{\nu\beta\pi}{2}\cos\frac{\nu\pi x}{\tau}. \qquad (4.5)$$

При прочих равных условиях амплитуды гармонических убывают здесь обратно пропорционально квадратам их порядков;

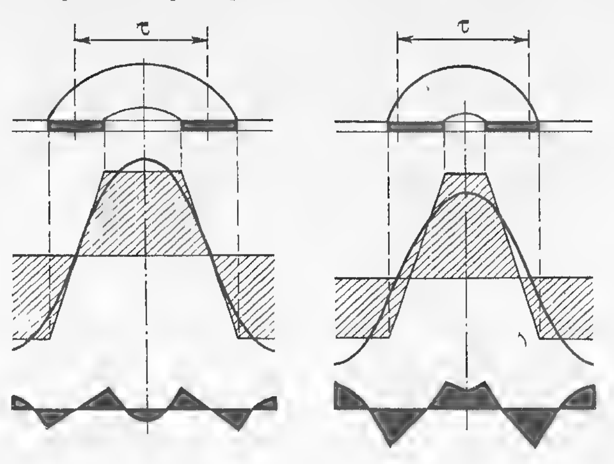


Рис. 4.14. Графики МДС гладкой однослойной обмотки однофазного тока при диаметральном и укороченном шагах

под этими условиями нужно понимать равенство абсолютных значений произведений периодических функций распределения и укорочения шага:

$$\left|\sin\frac{\nu'\gamma\pi}{2}\sin\frac{\nu'\beta\pi}{2}\right| = \left|\sin\frac{\nu''\gamma\pi}{2}\sin\frac{\nu''\beta\pi}{2}\right|.$$

Оно возможно при любых рациональных значениях чисел γ и β, так как при них обе функции, а значит, и их произведение имеют конечное число значений, периодически повторяющихся в зависимости от порядка ν, чего не будет при иррациональном значении хотя бы одного из них. Эта повторяемость тем чаще, чем

более простыми дробями выражаются числа γ и β и чем проще их соотношение. Для обмоток, заложенных в пазы,

$$\gamma = q/Q \text{ и } \beta = y/Q;$$

даже в том случае, если обе дроби несократимы, следовательно, их общим знаменателем является Q, полупериодом произведения будет то же число Q.

4.3. РАЗЛОЖЕНИЕ ПУЛЬСИРУЮЩИХ МДС НА ВРАЩАЮЩИЕСЯ

В предшествующем изложении отсутствовали указания на то, каким током питается обмотка, создающая МДС с тем или иным графиком распределения; все рассуждения могли быть отнесены одинаковым образом и к постоянному току, и к переменному. Но в последнем случае, очевидно, под током i, входящим в равенства (4.2)—(4.5), нужно понимать значения тока, определяемые законом его изменения во времени

$$i = f(t).$$

Тогда можно будет получить выражение, которое позволит определять значение МДС в любом месте и в любой момент времени. Если речь идет об однофазном переменном токе, оно может быть получено простым перемножением зависимости МДС от линейной координаты x на зависимость мгновенных значений тока от времени t:

$$F(x, t) = f(x)\, f(t).$$

Зависимость мгновенных значений тока от времени может иметь различный периодический характер, т. е. разлагаться в ряд гармонических функций времени — основную волну и высшие гармонические нечетных и четных порядков и даже иметь постоянную составляющую; тогда каждая гармоническая МДС, не изменяя свое положение в пространстве, будет пульсировать так, что изменение ее амплитуды во времени воспроизведет закон изменения тока. Таким образом, искомая зависимость МДС от времени t и линейной координаты x будет представлять бесконечный ряд бесконечных рядов, т. е. выражение чрезвычайной сложности; однако в большинстве практических случаев можно ограничиться учетом только основной волны изменения тока.

В этом случае каждый член разложения (4.4) должен быть умножен на одну и ту же гармоническую функцию $\sin \omega t$; такое произведение может быть разложено на сумму синусов полуразности и полусуммы их аргументов:

$$f_\nu(x, t) = \sin \omega t \cos \frac{\nu \pi x}{\tau} = \frac{1}{2}\left[\sin\left(\omega t - \frac{\nu \pi x}{\tau}\right) + \sin\left(\omega t + \frac{\nu \pi x}{\tau}\right)\right]. \tag{4.6}$$

Каждое из двух слагаемых в квадратных скобках, завися одновременно и от линейной координаты x, и от времени t, представляет синусоиду с неизменной амплитудой, движущуюся вдоль оси x, причем первая из этих синусоид движется в положительном направлении оси x, а вторая — в отрицательном; их амплитуды равны половине амплитуды синусоидально-пульсирующей составляющей данного порядка ν, а скорость движения обратно пропорциональна этому порядку, т. е. составляет $1/\nu$ скорости движения основной волны МДС. Действительно, в трехмерной системе координат x, $f(x)$, t каждое из слагаемых изображается волнообразной поверхностью, волны которой в плоскости x, t имеют

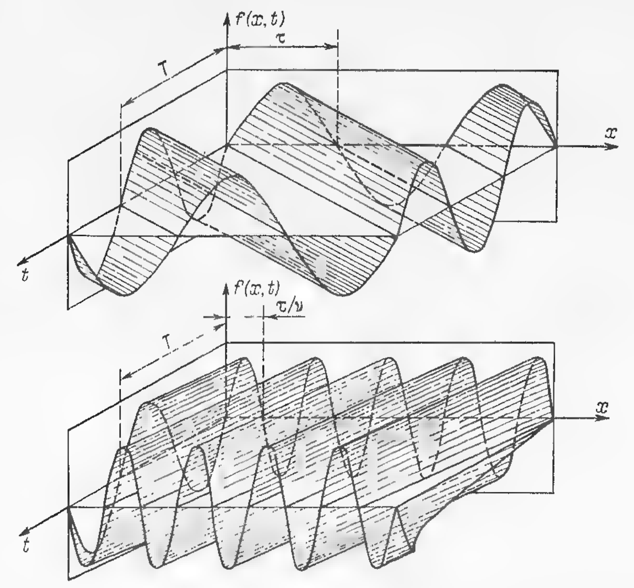


Рис. 4.15. Гармонические МДС с прямым и обратным направлениями вращения

наклон в ту или другую сторону. Пересечение такой поверхности с плоскостью, параллельной плоскости x, $f(x)$, дает синусоиду; если эта плоскость будет перемещаться в направлении оси t, то синусоида станет двигаться по ней в направлении, соответствующем наклону волновой поверхности. На рис. 4.15 даны две поверхности с различными порядками ν и различными наклонами в плоскости x, t; отчетливо видно, что за один и тот же промежуток времени T, равный периоду тока, каждая составляющая перемещается на длину своей волны.

Вращение в положительном направлении оси x называют *прямым* или *правым*, а в отрицательном — *обратным* или *левым*; в частности, когда дело касается основной волны, прямое вращение называют еще *синхронным*, а обратное — *обратносинхронным*. Составляющие прямого и обратного вращения гармони-

ческой МДС любого порядка могут быть изображены в виде двух равных векторов, вращающихся с одинаковой скоростью в противоположных направлениях. Их равнодействующая в любой момент времени будет представлять амплитуду пространственного распределения МДС в этот момент, как показано на рис. 4.16;

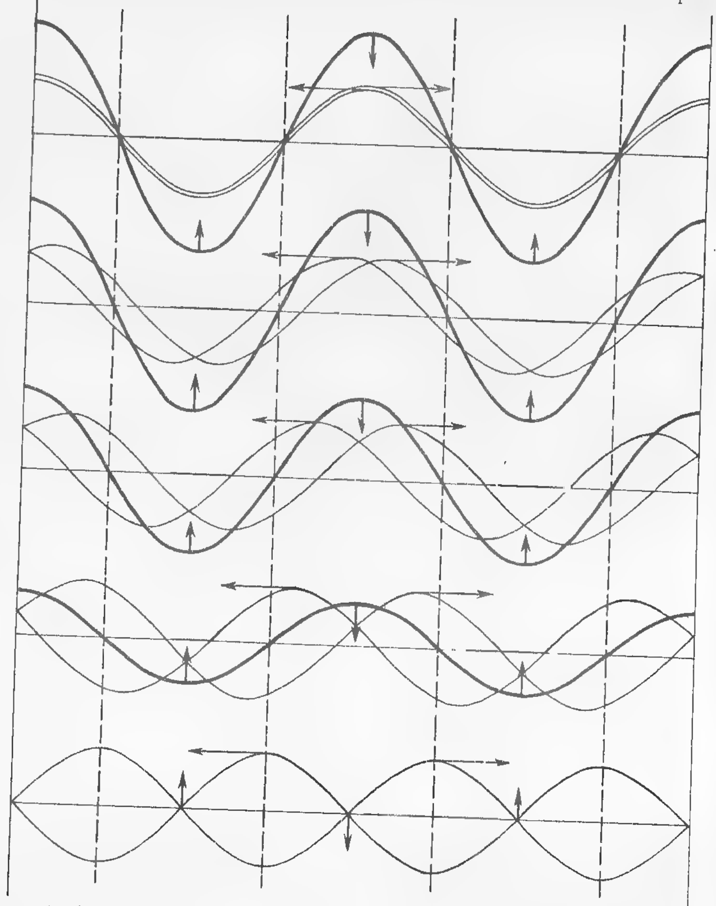


Рис. 4.16. Сложение составляющих прямого и обратного вращения

из него видно, как обе составляющие перемещаются в противоположные стороны с одинаковыми скоростями и с неизменными амплитудами, равными половине амплитуды пространственного распределения в начальный момент, когда ток имеет наибольшее значение.

При синусоидальном изменении тока во времени уравнение его мгновенных значений будет иметь общий вид

$$i = \sqrt{2} I \sin \omega t,$$

где I — действующее значение этого тока; отсюда общее уравнение изменения МДС в пространстве и времени может быть получено из выражения (4.4) подстановкой в него уравнения для мгновенного значения тока:

$$F(x, t) = \frac{\sqrt{2} I s q}{\pi} \sum_{\nu=1}^{\infty} \left\{ \pm \frac{k_{q\nu} k_{y\nu}}{\nu} \left[\sin\left(\omega t - \frac{\nu \pi x}{\tau}\right) + \sin\left(\omega t + \frac{\nu \pi x}{\tau}\right) \right] \right\}. \tag{4.7}$$

Здесь $\sqrt{2}/\pi = 0{,}4502$.

Аналогично этому для распределенной обмотки на основании выражения (4.5) можно написать

$$F(x, t) =$$

$$= \frac{2\sqrt{2} I w}{\gamma \pi^2} \sum_{\nu=1}^{\infty} \left\{ \pm \frac{k_{y\nu}}{\nu^2} \sin \frac{\nu \gamma \pi}{2} \left[\sin\left(\omega t - \frac{\nu \pi x}{\tau}\right) + \sin\left(\omega t + \frac{\nu \pi x}{\tau}\right) \right] \right\}. \tag{4.8}$$

Здесь $2\sqrt{2}/\pi^2 = 0{,}2866$.

4.4. МДС ОБМОТКИ ДВУХФАЗНОГО ТОКА

Всякая симметричная обмотка многофазного тока с числом фаз m является совмещением на одном сердечнике m вполне одинаковых обмоток однофазного тока, расположенных с относительными сдвигами, соответствующими числу фаз. Поэтому при определении МДС, образуемой такой обмоткой при питании ее токами этого же числа фаз, необходимо учитывать как размещение обмотки, так и разность фаз питающих токов. В процессе общего рассмотрения предполагается, что все токи имеют одинаковые амплитудные, а следовательно, и действующие значения, изменяются по синусоидальному закону и относительные сдвиги между ними во времени точно соответствуют числу фаз.

Простейшим видом обмотки многофазного тока является обмотка двухфазного тока — сочетание двух одинаковых обмоток однофазного тока, смещенных на половину полюсного деления по отношению друг к другу. Эти смещения и сдвиги токов во времени удобно распределить поровну между обеими обмотками однофазного тока; тогда для гармонической порядка ν результирующей МДС обмотки двухфазного тока следует написать

$$f_\nu(x, t) = \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right) \cos\left(\frac{\nu \pi x}{\tau} - \frac{\nu \pi}{4}\right) +$$

$$+ \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right) \cos\left(\frac{\nu \pi x}{\tau} + \frac{\nu \pi}{4}\right). \tag{4.9}$$

Каждое из слагаемых разлагается на составляющие прямого и обратного вращения:

$$f_\nu(x, t) = \frac{1}{2}\left\{\sin\left[\omega t + \frac{\nu\pi x}{\tau} - (\nu+1)\frac{\pi}{4}\right] + \right.$$

$$+ \sin\left[\omega t - \frac{\nu\pi x}{\tau} + (\nu-1)\frac{\pi}{4}\right] + \sin\left[\omega t + \frac{\nu\pi x}{\tau} + (\nu+1)\frac{\pi}{4}\right] +$$

$$\left. + \sin\left[\omega t - \frac{\nu\pi x}{\tau} - (\nu-1)\frac{\pi}{4}\right]\right\}.$$

Применяя преобразование по формуле

$$\sin\alpha + \sin\beta = 2\sin\frac{\alpha+\beta}{2}\cos\frac{\alpha-\beta}{2},$$

можно получить

$$f_\nu(x, t) = \sin\left(\omega t + \frac{\nu\pi x}{\tau}\right)\cos(\nu+1)\frac{\pi}{4} +$$

$$+ \sin\left(\omega t - \frac{\nu\pi x}{\tau}\right)\cos(\nu-1)\frac{\pi}{4}. \qquad (4.10)$$

Здесь следует рассмотреть четыре случая.

1. Если $\nu = 4i + 1$, где i — любое целое число, включая нуль, т. е. если $\nu = 1, 5, 9, 13, \ldots$, то

$$\cos(\nu+1)\frac{\pi}{4} = 0; \quad \cos(\nu-1)\frac{\pi}{4} = \pm 1;$$

следовательно,

$$f_\nu(x, t) = \pm\sin\left(\omega t - \frac{\nu\pi x}{\tau}\right).$$

2. Если $\nu = 4i + 2$, т. е. если $\nu = 2, 6, 10, 14, \ldots$, то

$$\cos(\nu+1)\frac{\pi}{4} = \mp\frac{\sqrt{2}}{2}; \quad \cos(\nu-1)\frac{\pi}{4} = \pm\frac{\sqrt{2}}{2},$$

откуда

$$f_\nu(x, t) = \mp\frac{\sqrt{2}}{2}\left[\sin\left(\omega t + \frac{\nu\pi x}{\tau}\right) - \sin\left(\omega t - \frac{\nu\pi x}{\tau}\right)\right] =$$

$$= \mp\sqrt{2}\cos\omega t\sin\frac{\nu\pi x}{\tau}.$$

3. Если $\nu = 4i + 3$, т. е. если $\nu = 3, 7, 11, 15, \ldots$, то

$$\cos(\nu+1)\frac{\pi}{4} = \mp 1; \quad \cos(\nu-1)\frac{\pi}{4} = 0,$$

и потому

$$f_\nu(x, t) = \mp\sin\left(\omega t + \frac{\nu\pi x}{\tau}\right).$$

4. Если $\nu = 4i + 4$, т. е. если $\nu = 4, 8, 12, 16, \ldots$, то

$$\cos(\nu+1)\frac{\pi}{4} = \mp\frac{\sqrt{2}}{2}; \quad \cos(\nu-1)\frac{\pi}{4} = \mp\frac{\sqrt{2}}{2},$$

так что

$$f_\nu(x, t) = \mp\frac{\sqrt{2}}{2}\left[\sin\left(\omega t + \frac{\nu\pi x}{\tau}\right) + \sin\left(\omega t - \frac{\nu\pi x}{\tau}\right)\right] =$$

$$= \mp\sqrt{2}\sin\omega t\cos\frac{\nu\pi x}{\tau}.$$

Верхние знаки соответствуют четным значениям i, в том числе нулю, а нижние — нечетным. Таким образом, нечетные значения ν дают попеременно составляющие прямого и обратного вращения, поочередно положительные и отрицательные, а четные значения ν дают неподвижные пульсирующие составляющие, попеременно различающиеся по начальной фазе и по знаку. В результате общее уравнение МДС будет иметь вид

$$F(x, t) = \frac{\sqrt{2}Isq}{\pi}\left[\frac{k_{q1}k_{y1}}{1}\sin\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right) + \frac{k_{q3}k_{y3}}{3}\sin\left(\omega t + \frac{3\pi x}{\tau}\right) - \right.$$

$$\left. - \frac{k_{q5}k_{y5}}{5}\sin\left(\omega t - \frac{5\pi x}{\tau}\right) - \frac{k_{q7}k_{y7}}{7}\sin\left(\omega t + \frac{7\pi x}{\tau}\right) + \cdots\right]. \qquad (4.11)$$

Пульсирующие составляющие четных порядков бесполезно перемагничивают сердечник, но обмотки двухфазного тока с целыми числами пазов на полюс и фазу всегда допускают приведение их к диаметральному шагу, и потому гармонические четных порядков в их МДС не содержатся. Тем не менее состав их МДС нельзя считать удовлетворительным: за основной волной следует гармоническая порядка 3 с обратным вращением и довольно большой амплитудой, поскольку значение коэффициента распределения для нее k_{q3} при всех числах пазов на полюс и фазу довольно велико. Правда, эта гармоническая может быть если не исключена полностью, то значительно уменьшена укорочением шага, ближайшим к $\beta = 2/3$, но при нем, с одной стороны, будут довольно велики коэффициенты укорочения шага для гармонических порядков 5 и 7, а с другой — значительно понижается обмоточный коэффициент для основной волны, и без того не очень высокий. Все это не является достоинством обмотки двухфазного тока.

При увеличении числа пазов на полюс и фазу до бесконечности коэффициенты распределения обмотки двухфазного тока в соответствии с выражением (3.24) стремятся к пределам

$$\lim_{q\to\infty} k_{q\nu} = \frac{4}{\nu\pi}\sin\frac{\nu\pi}{4};$$

поскольку, согласно предыдущему, ν может принимать здесь только нечетные значения, то

$$\sin\frac{\nu\pi}{4} = \pm\frac{\sqrt{2}}{2}.$$

Знаки чередуются здесь попарно: плюс при $\nu = 1, 3, 9, 11, \ldots$ и минус при $\nu = 5, 7, 13, 15, \ldots$ Таким образом, уравнение МДС распределенной обмотки принимает вид

$$F(x, t) = \frac{4Iw}{\pi^2}\left[\frac{k_{y1}}{1}\sin\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right) - \frac{k_{y3}}{9}\sin\left(\omega t + \frac{3\pi x}{\tau}\right) - \right.$$

$$\left. - \frac{k_{y5}}{25}\sin\left(\omega t - \frac{5\pi x}{\tau}\right) + \frac{k_{y7}}{49}\sin\left(\omega t + \frac{7\pi x}{\tau}\right) + \cdots\right]. \qquad (4.12)$$

Здесь $4/\pi^2 = 0,4053$.

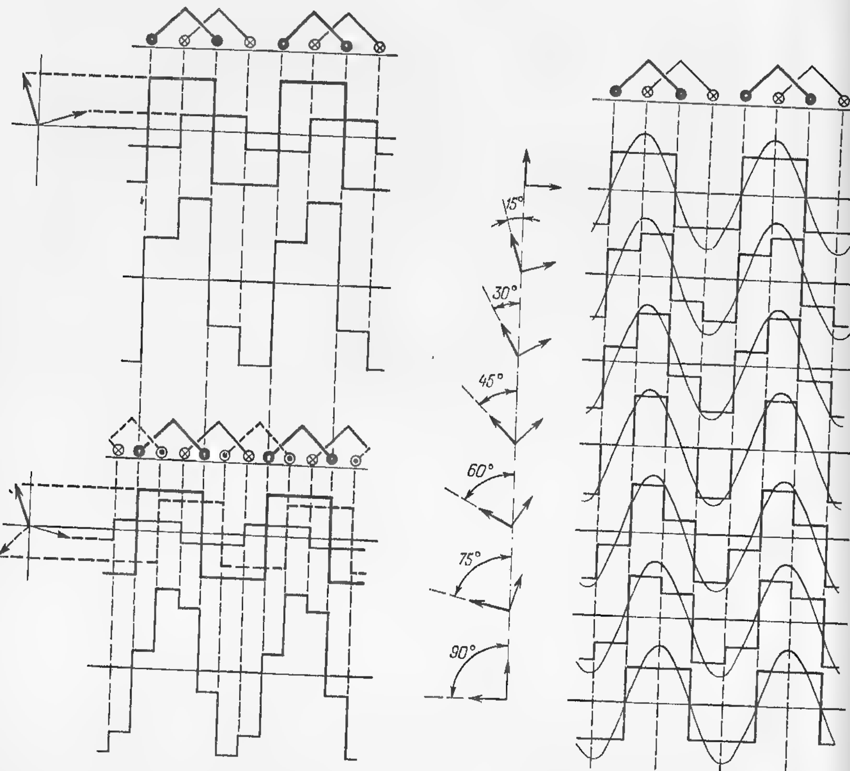


Рис. 4.17. Порядок построения графиков МДС обмоток многофазного тока

Рис. 4.18. Графики МДС простейшей обмотки двухфазного тока

Для реверсирования машины двухфазного тока, имеющей выводы начал и концов обеих фаз, достаточно изменить направление тока в любой из них; если же обмотка имеет только три вывода, то нужно поменять местами два линейных проводника, оставив общий проводник на месте.

При построении графика МДС обмотки однофазного тока не возникал вопрос о моменте времени, для которого производится построение; при изменении тока, питающего обмотку, все ординаты графика изменялись одновременно в одном

и том же отношении. Но токи в обмотке любого многофазного тока изменяются неодновременно, и потому следует рассмотреть порядок построения графиков МДС таких обмоток.

На рис. 4.17 представлены две простейшие обмотки — двухфазного и трехфазного тока с одним и тем же числом пазов на полюс и фазу $q = 1$ и с одинаковой длиной полюсного деления; естественно, что при этом у них различны шаги пазов. График МДС каждой фазы состоит из прямоугольников с одинаковыми основаниями и ординатами попеременно разных знаков, изменяющимися пропорционально току данной фазы. Если считать положительными ординаты в пределах секции, обтекаемой током от начала фазы к ее концу (или от линейного вывода к нулевой точке), то вне пределов секции эти ординаты будут отрицательными.

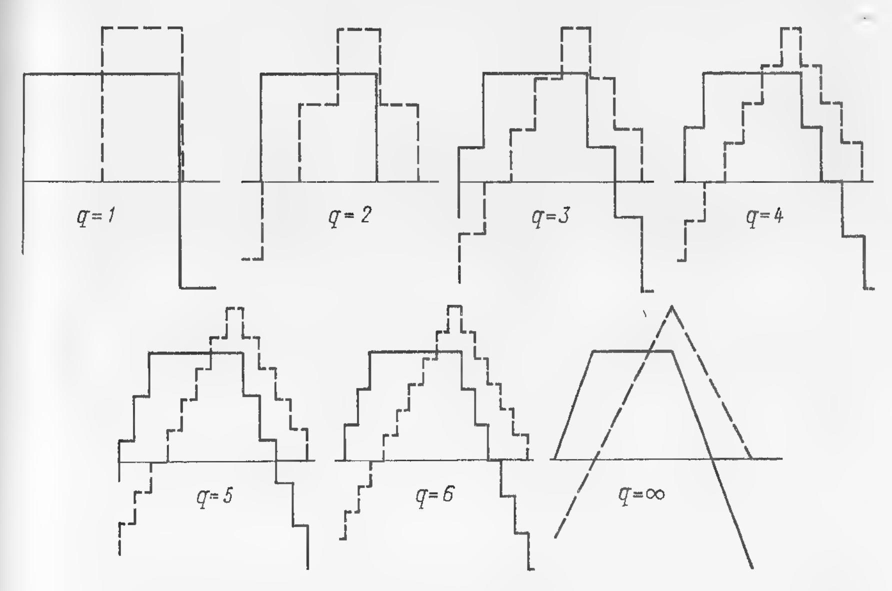


Рис. 4.19. Характерные формы графиков МДС обмоток двухфазного тока с различными числами пазов на полюс и фазу

Значения ординат определяются при этом проекциями векторов токов на некоторое направление, в данном случае вертикальное. Ниже графиков МДС отдельных фаз помещены результирующие графики, полученные алгебраическим суммированием их ординат. Масштабы векторов токов выбраны так, чтобы обе обмотки давали одну и ту же амплитуду основной волны МДС.

Такой порядок построения применен на рис. 4.18 для того, чтобы проследить изменение графика МДС обмотки двухфазного тока между моментами времени, отличающимися друг от друга на 1/24 периода или 15° эл. начиная от момента, когда ток в одной из фаз наибольший.

В первый из рассматриваемых моментов ток в первой фазе имеет наибольшее значение, а во второй равен нулю; соответственно этому МДС обмотки образуется только первой фазой. В следующий момент, спустя 1/24 периода или 15° эл., появился ток во второй фазе, а ток в первой фазе несколько уменьшился; график суммарной МДС приобрел несимметричную ступенчатую форму, одинаковую на всех полюсных делениях. Далее ступенчатая форма продолжает изменяться — правая ступень поднимается, а левая понижается до тех пор, пока токи в фазах не достигнут одинаковых мгновенных значений; в этот момент суммарный график снова приобретает симметричную прямоугольную форму, но уже иную, чем вна-

чале — высоты прямоугольников стали бо́льшими, а основания их — меньшими, так что между ними появились разрывы, которых раньше не было. После этого график проходит последовательно через все те же очертания, что и раньше, но в обратном порядке и в зеркальном отображении. По истечении 1/4 периода от начала процесса ток в первой фазе принимает нулевое значение, а во второй достигает наибольшего; как и в начале рассмотрения, график восстановил первоначальную форму, но сместился на 1/2 полюсного деления. В дальнейшем все пойдет снова в том же порядке, пока ток во второй фазе не обратится в нуль, а в первой достигнет наибольшего значения, но с обратным знаком против первоначального момента. Таким образом, график суммарной МДС непрерывно изменяется между двумя симметричными формами, причем на всех промежуточных стадиях сохраняется одинаковость формы на всех полюсных делениях, что свидетельствует об отсутствии гармонических четных порядков.

Если разложить каждую из форм в гармонический ряд, то будет видно, что за равные промежутки времени все гармонические перемещаются на одинаковые расстояния, обратно пропорциональные их порядкам, и поочередно в разных направлениях. Из них на рис. 4.18 нанесена только основная волна, перемещающаяся от момента к моменту на 1/12 полюсного деления. На рис. 4.19 представлены две симметричные формы графиков МДС обмоток двухфазного тока с диаметральным шагом и целыми числами пазов на полюс и фазу от 1 до 6, а также графики МДС распределенной обмотки, к которым они приближаются по мере увеличения числа пазов на полюс и фазу. Обе эти предельные формы еще довольно далеки от синусоиды.

4.5. МДС ОБМОТКИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Обмотка трехфазного тока является сочетанием трех одинаковых обмоток однофазного тока, обычно с $\gamma = 1/3$, последовательно смещенных по окружности на 2/3 полюсного деления, что можно представить и как смещение на эту же величину двух обмоток в противоположные стороны по отношению к одной обмотке, принимаемой за первую. Тогда такие смещения будут учитываться заменой аргумента $\nu\pi x/\tau$ на $\nu\pi x/\tau - 2\nu\pi/3$ для одной обмотки и на $\nu\pi x/\tau + 2\nu\pi/3$ для другой. Аналогично этому сдвиги во времени между токами, питающими обмотки, изобразятся заменой аргумента ωt соответственно на $\omega t - 2\pi/3$ и $\omega t + 2\pi/3$. В результате для члена разложения порядка ν можно будет написать

$$f_\nu(x, t) = \sin\omega t\cos\frac{\nu\pi x}{\tau} + \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\cos\left(\frac{\nu\pi x}{\tau} - \frac{2\nu\pi}{3}\right) + \\ + \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)\cos\left(\frac{\nu\pi x}{\tau} + \frac{2\nu\pi}{3}\right). \quad (4.13)$$

Разложение каждой из трех пульсирующих составляющих на две вращающиеся дает

$$f_\nu(x, t) = \frac{1}{2}\left\{\sin\left(\omega t - \frac{\nu\pi x}{\tau}\right) + \sin\left(\omega t + \frac{\nu\pi x}{\tau}\right) + \right. \\ + \sin\left[\omega t - \frac{\nu\pi x}{\tau} + \frac{2(\nu-1)\pi}{3}\right] + \sin\left[\omega t + \frac{\nu\pi x}{\tau} - \frac{2(\nu+1)\pi}{3}\right] + \\ \left. + \sin\left[\omega t - \frac{\nu\pi x}{\tau} - \frac{2(\nu-1)\pi}{3}\right] + \sin\left[\omega t + \frac{\nu\pi x}{\tau} + \frac{2(\nu+1)\pi}{3}\right]\right\}.$$

Преобразуя суммы третьего слагаемого с пятым и четвертого с шестым, можно получить

$$f_\nu(x, t) = \frac{1}{2}\left[\sin\left(\omega t - \frac{\nu\pi x}{\tau}\right) + \sin\left(\omega t + \frac{\nu\pi x}{\tau}\right) + \right. \\ \left. + 2\sin\left(\omega t - \frac{\nu\pi x}{\tau}\right)\cos\frac{2(\nu-1)\pi}{3} + 2\sin\left(\omega t + \frac{\nu\pi x}{\tau}\right)\cos\frac{2(\nu+1)\pi}{3}\right] = \\ = \frac{1}{2}\left\{\sin\left(\omega t - \frac{\nu\pi x}{\tau}\right)\left[1 + 2\cos\frac{2(\nu-1)\pi}{3}\right] + \right. \\ \left. + \sin\left(\omega t + \frac{\nu\pi x}{\tau}\right)\left[1 + 2\cos\frac{2(\nu+1)\pi}{3}\right]\right\}. \quad (4.14)$$

Здесь следует рассмотреть три случая.

1. Если $\nu = 3i + 1$, где i — любое целое число, включая нуль, т. е. если $\nu = 1, 4, 7, 10, \ldots$, то

$$\frac{2(\nu-1)\pi}{3} = 2i\pi, \quad \cos\frac{2(\nu-1)\pi}{3} = 1;$$

$$\frac{2(\nu+1)\pi}{3} = 2i\pi + \frac{4\pi}{3}, \quad \cos\frac{2(\nu+1)\pi}{3} = -\frac{1}{2},$$

следовательно,

$$f_\nu(x, t) = \frac{1}{2}\left[3\sin\left(\omega t - \frac{\nu\pi x}{\tau}\right) + 0\cdot\sin\left(\omega t + \frac{\nu\pi x}{\tau}\right)\right] = \\ = \frac{3}{2}\sin\left(\omega t - \frac{\nu\pi x}{\tau}\right).$$

Гармонические таких порядков имеют прямое вращение, а их амплитуды в полтора раза больше, чем в МДС каждой из обмоток однофазного тока.

2. Если $\nu = 3i + 2$, т. е. если $\nu = 2, 5, 8, 11, \ldots$, то

$$\frac{2(\nu-1)\pi}{3} = 2i\pi + \frac{2\pi}{3}, \quad \cos\frac{2(\nu-1)\pi}{3} = -\frac{1}{2};$$

$$\frac{2(\nu+1)\pi}{3} = 2i\pi + 2\pi, \quad \cos\frac{2(\nu+1)\pi}{3} = 1;$$

отсюда

$$f_\nu(x, t) = \frac{1}{2}\left[0\cdot\sin\left(\omega t - \frac{\nu\pi x}{\tau}\right) + 3\sin\left(\omega t + \frac{\nu\pi x}{\tau}\right)\right] = \\ = \frac{3}{2}\sin\left(\omega t + \frac{\nu\pi x}{\tau}\right).$$

Гармонические этих порядков имеют обратное вращение, и их амплитуды также в полтора раза больше, чем в МДС обмоток однофазного тока.

3. Если $\nu = 3i + 3$, т. е. если $\nu = 3, 6, 9, 12, \ldots$, то

$$\frac{2(\nu-1)\pi}{3} = 2i\pi + \frac{4\pi}{3}, \quad \cos\frac{2(\nu-1)\pi}{3} = -\frac{1}{2};$$

$$\frac{2(\nu+1)\pi}{3} = 2i\pi + \frac{8\pi}{3}, \quad \cos\frac{2(\nu+1)\pi}{3} = -\frac{1}{2},$$

и потому

$$f_\nu(x,\ t) = 0,$$

т. е. гармонические с порядками, кратными трем, полностью отсутствуют, как и в сопряженной ЭДС обмотки трехфазного тока. Можно отметить, что сложение МДС трех фаз не вносит изменения в знаки при отдельных составляющих, как это было при сложении МДС двухфазной обмотки, а направления вращения гармонических здесь те же для порядков $\nu = 1,\ 2,\ 7,\ 8,\ 13,\ \ldots$ и противоположные для порядков $\nu = 4,\ 5,\ 10,\ 11,\ \ldots$ Кроме того, если при целых числах пазов на полюс и фазу гармонические четных порядков в МДС обмотки двухфазного тока не могли содержаться, то здесь этого нельзя утверждать, потому, что обмотки трехфазного тока не всегда допускают приведение к диаметральному шагу. Так, из предыдущего известно, что к диаметральному шагу не приводятся равносекционные однослойные обмотки с укороченным шагом при нечетных числах пазов на полюс и фазу q.

В результате изложенного можно написать общее уравнение МДС обмотки трехфазного тока с целым числом пазов на полюс и фазу в виде

$$F(x,\ t) = \frac{3\sqrt{2}Isq}{2\pi}\left[\frac{k_{q1}k_{y1}}{1}\sin\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right) + \frac{k_{q2}k_{y2}}{2}\sin\left(\omega t + \frac{2\pi x}{\tau}\right) - \right.$$
$$\left. - \frac{k_{q4}k_{y4}}{4}\sin\left(\omega t - \frac{4\pi x}{\tau}\right) + \frac{k_{q5}k_{y5}}{5}\sin\left(\omega t + \frac{5\pi x}{\tau}\right) - \cdots\right]. \qquad (4.15)$$

Таким образом, обмотка трехфазного тока имеет значительные преимущества перед обмоткой двухфазного тока; если исключить упомянутые случаи, когда ее МДС способна содержать гармонические четных порядков, наиболее ярко выраженными остаются гармонические порядков 5 и 7, имеющие в общем довольно высокие значения коэффициентов распределения. По этой причине наиболее рациональными укорочениями шага здесь должны быть такие, при которых гармонические данных порядков если и не исключены, что одновременно для обеих невозможно, то по крайней мере значительно ослаблены. Этому требованию достаточно хорошо удовлетворяет укорочение $\beta = 5/6$; оно может быть осуществлено при всех четных числах пазов на полюс и фазу. При нечетных числах остается только более или менее приближаться к нему; предпочтительны такие укорочения, которые сильно уменьшают или вовсе исключают содержание гармонической порядка 5, как $\beta = 4/5$, выполнимое при всех числах пазов, кратных 5.

При увеличении числа пазов на полюс и фазу до бесконечности, т. е. при переходе к распределенной обмотке, гармонические четных порядков выпадают, а коэффициенты распределения нечетных стремятся к пределам согласно выражению (3.26):

$$\lim_{q\to\infty} k_{q\nu} = \frac{6}{\nu\pi}\sin\frac{\nu\pi}{6}.$$

Так как ν здесь может принимать только нечетные значения, не кратные трем, то

$$\sin\frac{\nu\pi}{6} = \pm 0{,}5.$$

Знаки при остающихся членах чередуются попарно, и в результате все члены разложения оказываются положительными, так что уравнение МДС приобретает вид

$$F(x,\ t) = \frac{9\sqrt{2}Iw}{2\pi^2}\left[\frac{k_{y1}}{1}\sin\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right) + \frac{k_{y5}}{25}\sin\left(\omega t + \frac{5\pi x}{\tau}\right) + \right.$$
$$\left. + \frac{k_{y7}}{49}\sin\left(\omega t - \frac{7\pi x}{\tau}\right) + \cdots\right]. \qquad (4.16)$$

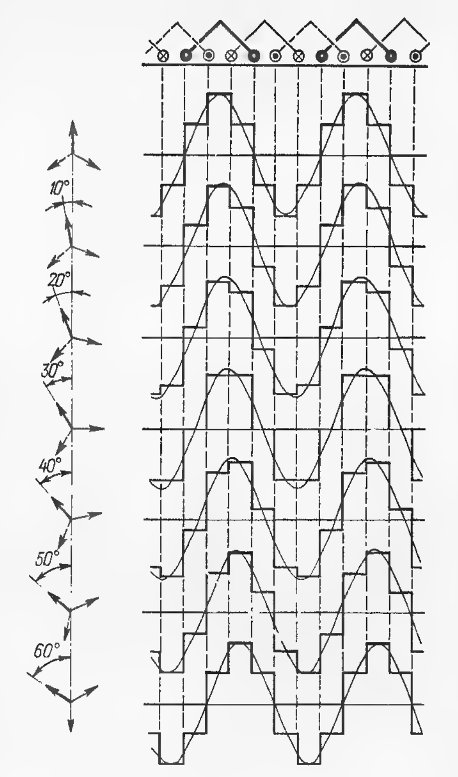
Здесь

$$9\sqrt{2}/(2\pi^2) = 0{,}6448.$$

Для реверсирования машины трехфазного тока нужно либо изменить порядок чередования фаз источника питания, либо поменять подключение двух фаз. Нулевой провод, если он имеется, никакой роли при этом не играет.

На рис. 4.20 представлены последовательные этапы изменения графика результирующей МДС той же простейшей обмотки трехфазного тока с числом пазов на полюс и фазу $q = 1$, как и на рис. 4.17, через интервалы времени в 1/36 периода или 10°. На первом из них ток в одной из фаз достигает наибольшего значения, а токи в двух других фазах равны его половине. В этот момент времени график МДС имеет симметричную форму, которая затем начинает постепенно искажаться сообразно изменению токов в фазах: самая верхняя площадка понижается, еще быстрее понижается площадка, находящаяся влево от нее, и почти так же быстро повышается находящаяся справа от нее.

По истечении 1/6 периода ток в одной из фаз принимает нулевое значение, а токи в двух других фазах становятся равными по абсолютному значению и противоположными по знакам. График МДС снова принимает симметричную форму, но на этот раз уже не ту, как в начале рассмотрения: вместо ступенчатой формы здесь образовались прямоугольники, разделенные интервалами. В дальнейшем, как и для обмотки двухфазного тока, все промежуточные формы снова повторяются в обратном порядке и зеркально отображенные, пока ток в следу-



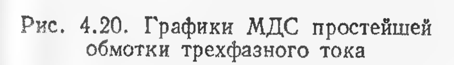


Рис. 4.20. Графики МДС простейшей обмотки трехфазного тока

ющей из фаз не достигнет наибольшего значения, но в противоположном направлении к наибольшему току в начале процесса.

Если выделить основную волну из каждой формы, которую приобретает график, то окажется, что она, как и для обмотки двухфазного тока, сохраняет неизменную амплитуду и каждый раз перемещается вправо на один и тот же отрезок, равный 1/18 полюсного деления.

На рис. 4.21 даны две симметричные формы графиков МДС обмоток трехфазного тока с числами пазов на полюс и фазу от 1 до 6, а также график для распределенной обмотки как предел, к которому стремятся эти графики при увеличении числа пазов на полюс и фазу. Сравнение с рис. 4.19 показывает, что предельные формы здесь значительно ближе к синусоиде, чего и следовало ожидать благодаря лучшему составу уравнений МДС.

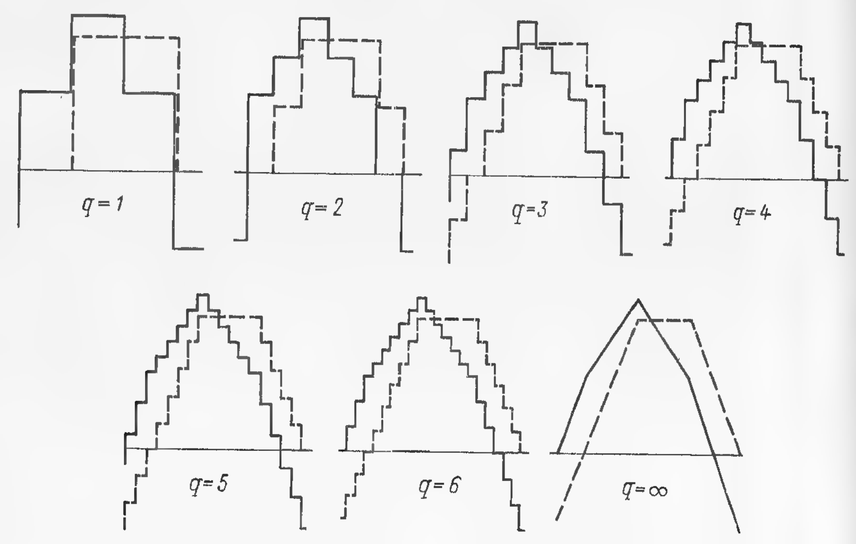


Рис. 4.21. Характерные формы графиков МДС обмоток трехфазного тока с различными числами пазов на полюс и фазу

Если представить форму графиков МДС, например, обмоток трехфазного тока разложенными на прямоугольники, основанием каждого из которых служит зубцовое деление, а высотой — МДС, создаваемая током в одном пазу, то окажется, что число таких прямоугольников составляет: для первой формы (когда ток в одной фазе достигает наибольшего значения) при четных числах q — точно $3{,}5q^2$, а при нечетных — несколько больше этого, но быстро приближается к нему по мере увеличения q; для второй формы (когда ток в одной фазе проходит через нулевое значение) при всех числах q оно равно точно $4q^2$, как это можно видеть из следующих данных:

Число пазов q . . .	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Число q^2	4	9	16	25	36	49	64	81	100
Число прямоугольников:									
первая форма . .	14	32	56	88	126	172	224	284	350
вторая форма . .	16	36	64	100	144	196	256	324	400

Эти числа прямоугольников могут оказаться полезными для оценки графиков МДС при дробных числах пазов, промежуточных между этими целыми, или же при целых, при которых обмотка отличается ненормальным распределением сторон секций на полюсных делениях.

Если производить построение графиков МДС для видоизмененных обмоток с распределением на 120°, то окажется, что они имеют те же формы, что и у нормальной обмотки с распределением на 60°, но только обмениваются местами: заостренная форма, приближающаяся к шатрообразной, соответствует прохождению тока одной из фаз через нулевое значение, а уплощенная, стремящаяся к трапеции — наибольшему значению тока в одной из фаз. При этом амплитуды всех гармонических в $\sqrt{3}/2$ раз меньше, чем у нормальной обмотки с тем же числом пазов на полюс и фазу q.

4.6. МДС ОБМОТКИ ШЕСТИФАЗНОГО ТОКА

Обмотка шестифазного тока является сочетанием на общем сердечнике двух одинаковых обмоток трехфазного тока, отличающихся от обычных только тем, что на каждом полюсном делении каждая фаза занимает не 1/3, а только 1/6 общего объема пазов. Для однослойной обмотки это равносильно тому, что каждая фаза распределяется на дуге 30° эл., а не 60°, как в обмотке трехфазного тока, т. е. обмотка является более сосредоточенной; в результате коэффициенты распределения этих обмоток для основной волны необычайно высоки, что является немаловажным достоинством. Правда, одновременно высоки и коэффициенты распределения для гармонических ближайших порядков — 5 и 7; но, как будет видно в дальнейшем, это не имеет значения, по крайней мере в отношении МДС обмоток с целыми числами пазов на полюс и фазу. Две такие обмотки смещены взаимно на 1/6 полюсного деления, а токи в них сдвинуты по фазе на 1/12 периода. Естественно, что обмотки шестифазного тока должны обладать всеми свойствами обмоток трехфазного тока, в частности отсутствием гармонических с порядками, кратными трем, и тем же условием отфильтровывания гармонических четных порядков. Понятно, что направления вращения гармонических у обеих обмоток одинаковы.

Относительное смещение этих двух обмоток в пространстве и относительный сдвиг питающих их токов во времени удобно распределить поровну между ними; тогда для одной из них, например опережающей в пространстве и во времени, можно написать

$$f'_\nu(x, t) = \frac{3}{2}\sin\left[\left(\omega t + \frac{\pi}{12}\right) \mp \left(\frac{\nu\pi x}{\tau} + \frac{\nu\pi}{12}\right)\right] =$$

$$= \frac{3}{2}\sin\left[\omega t \mp \frac{\nu\pi x}{\tau} \mp (\nu \mp 1)\frac{\pi}{12}\right],$$

а для другой

$$f''_\nu(x, t) = \frac{3}{2}\sin\left[\left(\omega t - \frac{\pi}{12}\right) \mp \left(\frac{\nu\pi x}{\tau} - \frac{\nu\pi}{12}\right)\right] =$$

$$= \frac{3}{2}\sin\left[\omega t \mp \frac{\nu\pi x}{\tau} \pm (\nu \mp 1)\frac{\pi}{12}\right].$$

Здесь верхние знаки соответствуют гармоническим прямого вращения, а нижние — обратного вращения. Если теперь применить преобразование

$$\sin\alpha + \sin\beta = 2\sin\frac{\alpha+\beta}{2}\cos\frac{\alpha-\beta}{2},$$

то получится уравнение для гармонических МДС обмотки шестифазного тока

$$f_\nu(x, t) = f'_\nu(x, t) + f''_\nu(x, t) = 3\sin\left(\omega t \mp \frac{\nu\pi x}{\tau}\right)\cos(\nu \mp 1)\frac{\pi}{12}.$$

1. При $\nu = 1, 23, 25, \ldots$, т. е. для гармонических нечетных порядков $\nu = 24i \mp 1$,

$$\cos(\nu \mp 1)\frac{\pi}{12} = 1,$$

и, следовательно,

$$f_\nu(x, t) = 3\sin\left(\omega t \mp \frac{\nu\pi x}{\tau}\right).$$

2. При $\nu = 11, 13, 35, 37, \ldots$, т. е. для гармонических нечетных порядков $\nu = 12(2i \mp 1) \mp 1$,

$$\cos(\nu \mp 1)\frac{\pi}{12} = -1,$$

и потому

$$f_\nu(x, t) = -3\sin\left(\omega t \mp \frac{\nu\pi x}{\tau}\right).$$

3. При $\nu = 5, 7, 17, 19, \ldots$, т. е. для всех прочих гармонических нечетных порядков,

$$\cos(\nu \mp 1)\frac{\pi}{12} = 0,$$

так что

$$f_\nu(x, t) = 0.$$

4. При $\nu = 2, 4, 20, 22, \ldots$, т. е. для части гармонических четных порядков,

$$\cos(\nu \mp 1)\frac{\pi}{12} = \frac{\sqrt{2}}{2},$$

откуда

$$f_\nu(x, t) = \frac{3\sqrt{2}}{2}\sin\left(\omega t \mp \frac{\nu\pi x}{\tau}\right).$$

5. При $\nu = 8, 10, 14, 16, \ldots$, т. е. для прочих гармонических четных порядков,

$$\cos(\nu \mp 1)\frac{\pi}{12} = -\frac{\sqrt{2}}{2},$$

стало быть,

$$f_\nu(x, t) = -\frac{3\sqrt{2}}{2}\sin\left(\omega t \mp \frac{\nu\pi x}{\tau}\right).$$

Таким образом, МДС обмотки шестифазного тока при целых числах пазов на полюс и фазу содержит только гармонические нечетных порядков вида

$$\nu = 12i \mp 1, \tag{4.17}$$

где i — любое целое число или нуль, соответствующий основной волне, т. е. только таких порядков, которые могут быть зубцовыми в этих обмотках; гармонические прочих порядков исключаются независимо от значений соответствующих им обмоточных коэффициентов, в том числе и гармонические четных порядков, которые не могут присутствовать, если существует возможность приведения обмотки к диаметральному шагу. Эта возможность всегда обеспечена в двухслойных обмотках с целыми числами пазов на полюс и фазу при любом укорочении шага; в следующей главе будет рассмотрен случай, когда она не обеспечивается, и тогда гармонические четных порядков присутствуют, однако при прочих равных условиях преуменьшенные в отношении $3\sqrt{2}/2 : 3 = 0{,}70711$.

После всего изложенного уравнение МДС обмотки шестифазного тока может быть написано так:

$$F(x, t) = \frac{3\sqrt{2}Isq}{\pi}\left[\frac{k_{q1}k_{y1}}{1}\sin\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right) + \right.$$

$$\left. + \frac{k_{q11}k_{y11}}{11}\sin\left(\omega t + \frac{11\pi x}{\tau}\right) - \frac{k_{q13}k_{y13}}{13}\sin\left(\omega t - \frac{13\pi x}{\tau}\right) - \cdots\right]. \tag{4.18}$$

При увеличении числа пазов на полюс и фазу до бесконечности пределами коэффициентов распределения согласно выражению (3.30) являются

$$\lim_{q\to\infty} k_{q\nu} = \frac{12}{\nu\pi}\sin\frac{\nu\pi}{12}.$$

Поскольку здесь ν может принимать только ограниченное число значений, удовлетворяющих выражению (4.15),

$$\sin\frac{\nu\pi}{12} = \pm\frac{1}{2}\sqrt{2-\sqrt{3}}.$$

Знаки чередуются здесь попарно: плюс при $\nu = 1, 11, 25, 35, \ldots$ и минус при $\nu = 13, 23, 37, \ldots$ В результате уравнение

МДС приобретает вид

$$F(x, t) = \frac{18\sqrt{2}\sqrt{2-\sqrt{3}}I\omega}{\pi^2}\left[\frac{k_{y1}}{1}\sin\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right) - \right.$$

$$\left. - \frac{k_{y11}}{121}\sin\left(\omega t + \frac{11\pi x}{\tau}\right) - \frac{k_{y13}}{169}\sin\left(\omega t - \frac{13\pi x}{\tau}\right) + \cdots\right]. \quad (4.19)$$

Здесь

$$\frac{18\sqrt{2}\sqrt{2-\sqrt{3}}}{\pi^2} = 1{,}3351.$$

На рис. 4.22 изображена простейшая обмотка шестифазного тока с числом пазов на полюс и фазу $q = 1$ и под ней — разложение ее на две обмотки трехфазного тока; далее показаны графики МДС этих обмоток в моменты времени

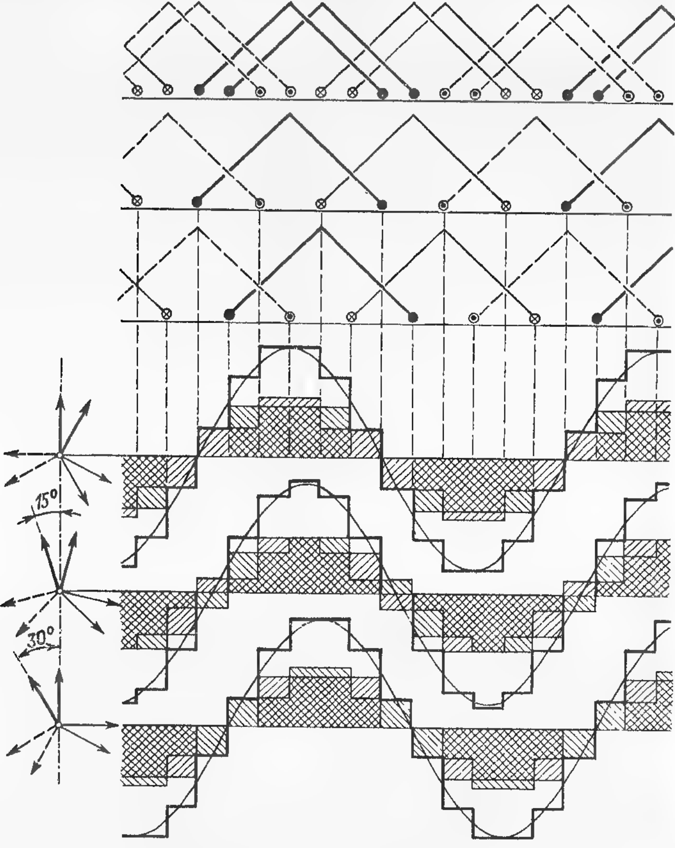


Рис. 4.22. Графики МДС простейшей обмотки шестифазного тока

через 1/24 периода начиная с момента, в который ток одной из фаз одной обмотки достигает наибольшего значения; они являются фигурами, уже знакомыми из рис. 4.20. Суммирование последних дает графики МДС обмотки шестифазного тока; даже в таком примитивном случае, как рассматриваемый, заметно,

что эти графики более близки к своим основным волнам, чем в любом из рассмотренных ранее случаев. Симметричные формы повторяются здесь вдвое чаще, чем для обмоток трехфазного тока. Изменение форм графиков МДС при увеличении числа пазов на полюс и фазу представлено на рис. 4.23; их предельные формы очень мало отличаются от синусоиды.

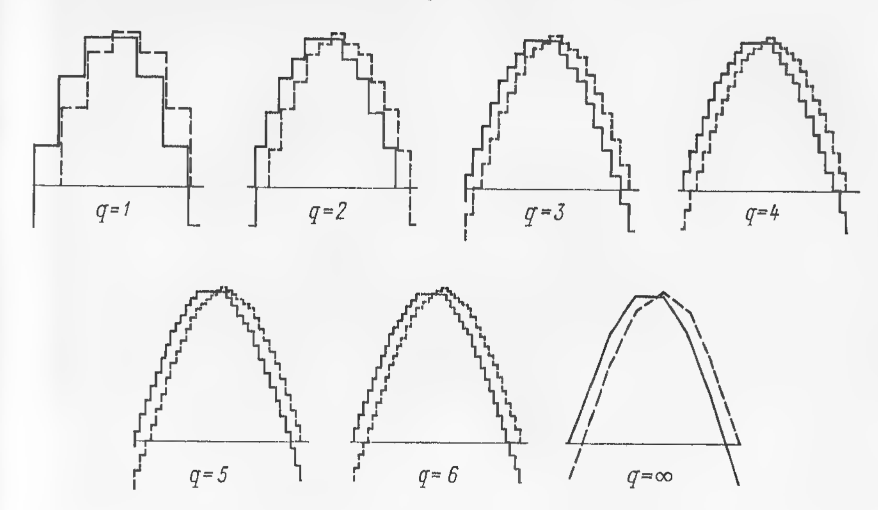


Рис. 4.23. Характерные формы графиков МДС обмоток шестифазного тока с различными числами пазов на полюс и фазу

Поскольку первой парой порядков гармонических здесь являются $\nu = 11$ и 13, имеет смысл применять такое укорочение шага, при котором оба эти порядка если и не исключаются полностью, то во всяком случае сильно уменьшаются. Таким укорочением является $\beta = 11/12$, которое может быть выполнено при всяком четном числе пазов на полюс и фазу; при нем коэффициенты укорочения имеют значения $k_{y11} = k_{y13} = 0{,}130$.

4.7. МНОГОУГОЛЬНИКИ ГЕРГЕСА

Построение графиков МДС для различных моментов времени представляет трудоемкую задачу, особенно при больших числах пазов на полюс и фазу, а тем более для произвольного момента времени, в который токи во всех фазах имеют различные мгновенные значения.

Между тем при целых числах пазов на полюс и фазу эта задача может быть очень упрощена. Если построить правильный многоугольник с числом сторон, равным удвоенному числу фаз, и разделить каждую его сторону на число частей, равное числу пазов на полюс и фазу данной обмотки, то проекции всех этих частей на любое направление будут представлять ступени графика МДС для определенного момента времени. Такие фигуры носят название *многоугольников Гергеса*.

Для пояснения этого на рис. 4.24, *а* приведено построение многоугольника для обмотки двухфазного тока с числом пазов на полюс и фазу $q = 3$; согласно предыдущему им является квадрат, каждая сторона которого разделена на три части. На продолжении одной из осей симметрии этого квадрата отложены равные отрезки произвольной длины, изображающие зубцовые деления, и через их концы проведены параллельные линии, перпендикулярные этой оси. Если теперь перенумеровать все точки деления сторон многоугольника и все отрезки на оси, а затем через каждую точку деления провести прямую, параллельную оси, так,

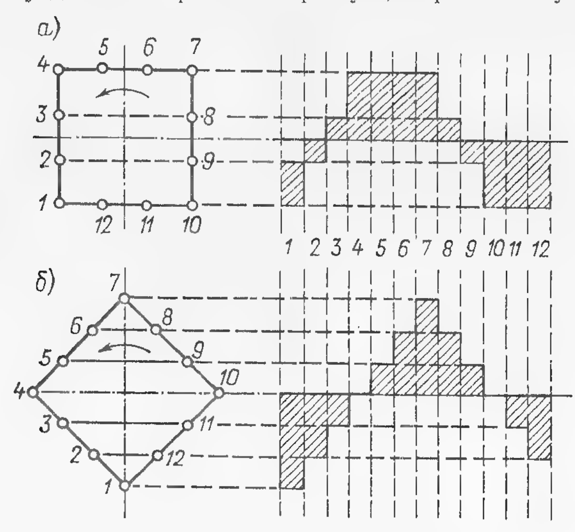


Рис. 4.24. Многоугольники Гергеса для однослойной обмотки двухфазного тока с $q = 3$

чтобы она перекрыла отрезок с тем же номером, то в результате получится график МДС. Нетрудно убедиться, что он точно совпадает с одной из форм на рис. 4.19, а именно соответствующей моменту, когда ток в одной из фаз равен нулю.

В данном случае квадрат расположен так, что две из его сторон параллельны оси, на которой отложены отрезки, и, следовательно, длины проекций всех их частей равны нулю; это положение соответствует моменту, когда ток в одной из фаз отсутствует. Если теперь повернуть квадрат на 45° в направлении против часовой стрелки, как это сделано на рис. 4.24, *б*, и повторить проецирование отрезков так же, как и в предыдущем случае, то получится новый график, соответствующий моменту, когда мгновенные значения токов в обеих фазах одинаковы; он в точности совпадает с другой из форм на рис. 4.19, соответствующей моменту, отстоящему от первого на 1/8 часть периода, т. е. на 45° эл. Подобная диаграмма для обмотки трехфазного тока имеет вид правильного

шестиугольника, как показано на рис. 4.25, *а*, *б* для того же числа пазов на полюс и фазу $q = 3$.

Поворот многоугольника может быть сделан на любой иной угол, что дает возможность получать графики распределения МДС для любых моментов времени с соответствующими им соотношениями токов в фазах, как, например, на рис. 4.26. Вместо того чтобы поворачивать многоугольник, можно поворачивать на тот же угол в противоположном направлении ось проекции, что во многих случаях удобнее.

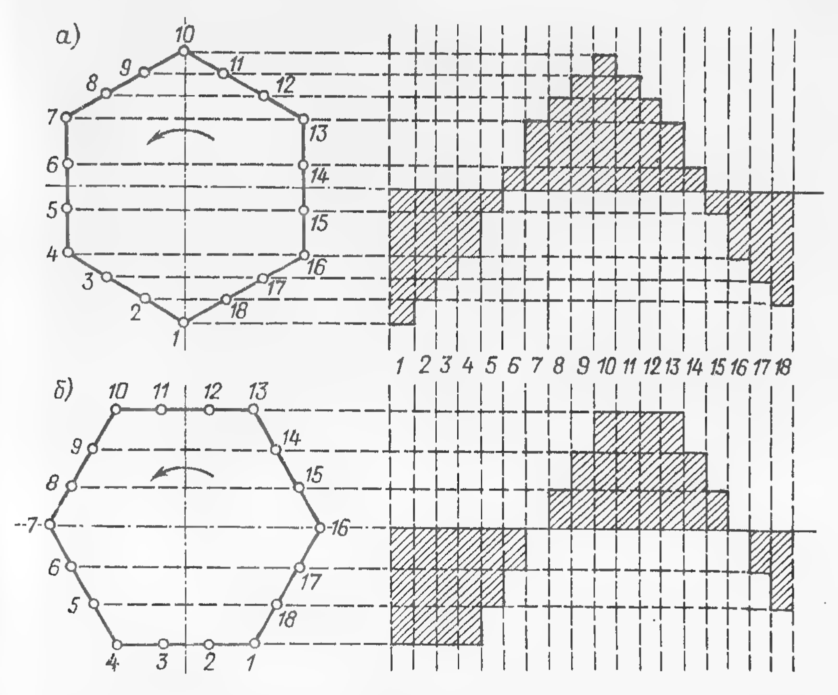


Рис. 4.25. Многоугольники Гергеса для однослойной обмотки трехфазного тока с $q = 3$

Рассмотренные построения относились к обмоткам с диаметральным шагом; однако многоугольники Гергеса могут быть построены и для обмоток с укороченным шагом, двухслойных или однослойных. В двухслойных обмотках при умеренных укорочениях шага одна часть пазов содержит проводники только одной какой-либо фазы, а другая часть — проводники двух фаз. При этом токи в таких проводниках имеют разность фаз, равную половине фазного угла, т. е. 60° при трех фазах и 30° — при шести; только для двухфазной обмотки эта разность фаз равна фазному углу. Но для МДС безразлично, находятся ли в таких пазах проводники с токами разных фаз или одной искусственной фазы, имеющей равнодействующие токи этих двух фаз. Поэтому в мно-

гоугольнике Гергеса для обмотки с укороченным шагом остаются на основных сторонах для данной фазы лишь части деления, соответствующие пазам с проводниками только одной этой фазы; число таких частей равно $mq - y$.

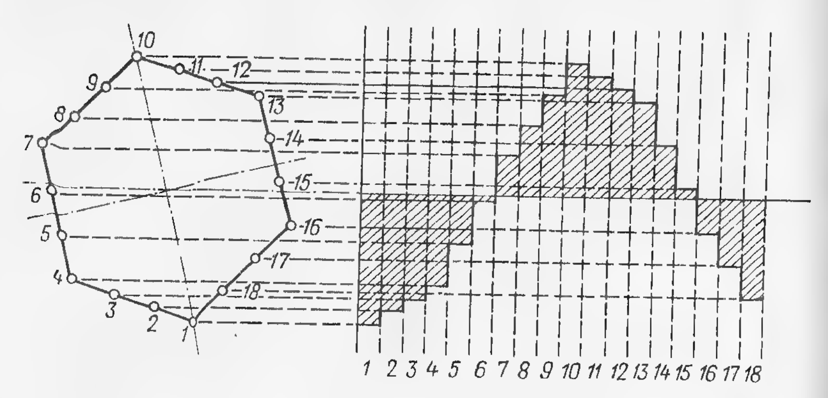


Рис. 4.26. То же, что на рис. 4.25, но для произвольного момента времени

Таким образом, число многоугольника удваивается; он продолжает вписываться всеми углами в окружность, диаметр которой уменьшается пропорцинально коэффициенту укорочения шага, но правильным не будет даже в том частном случае, когда каждая его сторона разделена на одно и то же число частей, т. е. когда

$$mq - y = y - (m - 1) q;$$

$$y = \frac{(2m - 1) q}{2},$$

потому что амплитуда равнодействующей токов двух разных фаз в одном пазу меньше, чем при токах одной и той же фазы, и во столько же раз новые стороны многоугольника короче при том же числе частей. Следует отметить, что последнее условие выполнимо лишь при четных числах пазов на полюс и фазу; подстановка в него числа фаз приводит к укорочениям шага $\beta = 3/4$ для обмоток двухфазного тока и $\beta = 5/6$ — трехфазного.

Пример построения многоугольника Гергеса для двухслойной обмотки трехфазного тока с $q = 3$ и $\beta = 7/9$ дан на рис. 4.27; при нем на каждом полюсном делении остается только по одному пазу, содержащему проводники

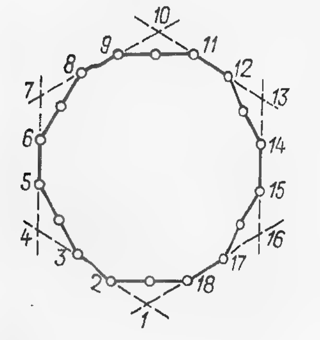


Рис. 4.27. Многоугольник Гергеса для двухслойной обмотки трехфазного тока с $q = 3$ и укорочением шага $\beta = 7/9$

только одной какой-либо фазы, и рядом с ним — по два паза с проводниками как данной фазы, так и одной из двух прочих.

Когда шаг становится равным

$$y = (m - 1) q,$$

в обмотке вовсе исчезают пазы с проводниками только одной фазы и число сторон многоугольника снова становится равным удвоенному числу фаз; графики МДС приобретают те же формы, что и при диаметральном шаге, но только все их ординаты становятся соответственно меньшими и формы обмениваются местами: в момент, когда ток в одной из фаз достигает наибольшего значения, график получает форму, соответствующую моменту, когда ток в одной из фаз равен нулю, и наоборот.

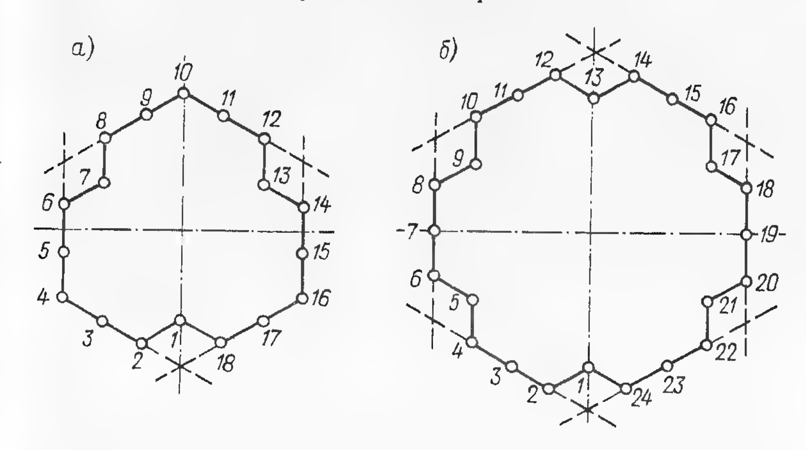


Рис. 4.28. Многоугольники Гергеса для однослойных обмоток трехфазного тока с укорочением шага: *а* — $q = 3$, $\beta = 7/9$; *б* — $q = 4$, $\beta = 5/6$

Несколько иначе происходит преобразование многоугольника для однослойной обмотки с укороченным шагом. В такой обмотке в некоторых местах чередуются пазы, содержащие проводники разных фаз; соответственно должны чередоваться в многоугольнике и отрезки, изображающие токи в пазах. Примеры такого построения даны на рис. 4.28 для двух обмоток трехфазного тока: $q = 3$, $\beta = 7/9$ и $q = 4$, $\beta = 5/6$. В первом случае (рис. 4.28, *а*) шестиугольник получает три выемки, соответствующие чередованию пазов с проводниками разных фаз, а во втором (рис. 4.28, *б*) — шесть таких выемок. Нечетное число выемок в первом из этих случаев свидетельствует о наличии в графиках МДС гармонических четных порядков, которое и следовало ожидать вследствие неодинаковости расположения проводников каждой фазы на соседних полюсных делениях, свойственной однослойным обмоткам с укороченным шагом при нечетных числах пазов на полюс и фазу.

Для обмотки шестифазного тока с диаметральным шагом многоугольник превращается в правильный двенадцатиугольник; если же шаг укорочен, то — в двадцатичетырехугольник, наиболее близкий к правильному при условии, указанном выше; как и для обмоток трехфазного тока, оно выполнимо только при четных значениях числа пазов на полюс и фазу и дает укорочение шага $\beta = 11/12$.

Многоугольники Гергеса могут находить применение при расчете индуктивных сопротивлений обмотки якоря, но это уже не составляет предмет данного рассмотрения.

4.8. МЕРЫ БОРЬБЫ С ГАРМОНИЧЕСКИМИ ЗУБЦОВЫХ ПОРЯДКОВ

Выше неоднократно отмечалось, что никаким устройством обмотки невозможно повлиять на гармонические так называемых зубцовых порядков

$$\nu_z = 2mqi \mp 1;$$

они отличаются тем, что коэффициенты распределения и укорочения шага, а вместе с ними и обмоточные коэффициенты для них имеют те же значения, что и для основной волны. Вследствие этого содержание гармонических зубцовых порядков в кривых распределения МДС зависит только от самих порядков, которым обратно пропорциональны их амплитуды.

Вредное влияние, оказываемое гармоническими зубцовых порядков, как и всяких иных гармонических, определяется амплитудами соответствующих им составляющих в кривых распределения индукции; его количественная оценка выходит за пределы данного рассмотрения, но борьба должна производиться против первопричины, т. е. их содержания в кривой распределения МДС, что можно сделать только косвенными способами.

Ранее отмечалась условность построения графиков МДС в виде ступенчатых фигур с прямыми углами; в какой-то степени они могут быть справедливы только при полузакрытых или вполне закрытых пазах, да и то с оговорками; что же касается открытых пазов, то для них следовало бы, по существу, изображать линейное нарастание МДС от одного края паза к другому. Зато подобие графиков индукции и МДС, конечно, при отсутствии заметного влияния насыщения активной стали могло бы иметь место именно при закрытых пазах, между тем как при открытых против каждого паза будет более или менее глубокий провал из-за сильного возрастания магнитного сопротивления зазора, тем более отчетливый, чем меньше зазор по сравнению с шириной паза. Как было показано в § 4.2, основой ступеней МДС служит биение гармонических близких друг другу порядков, которые и являются зубцовыми. Они движутся по отношению к создающей их обмотке в противоположные стороны, в результате чего местные макси-

мумы и минимумы кривой индукции, оставаясь неподвижными по отношению к обмотке, пульсируют с частотой создающего их тока, а пучности и узлы биения перемещаются в сторону движения основной волны поля и синхронно с нею.

Одним из простейших мероприятий по борьбе с влиянием зубцовых гармонических является смещение полюсов индуктора или только их наконечников, как показано на рис. 3.4 и 3.5; если в кривой поля такого индуктора содержатся гармонические зубцовых

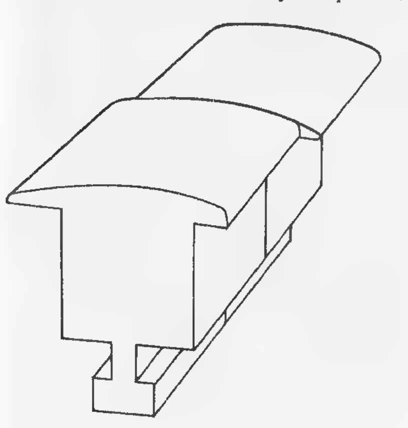
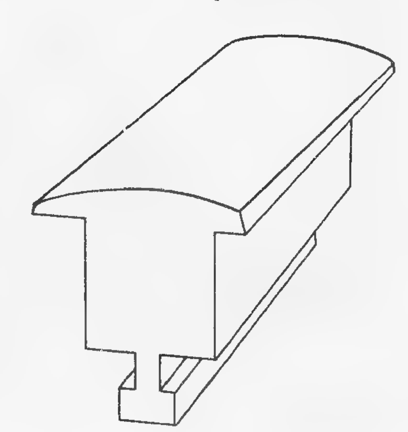


Рис. 4.29. Полюс со ступенчатым наконечником из двух половин

Рис. 4.30. Полюс с наконечником из четырех пакетов

порядков, то соответствующим подбором смещений можно направить навстречу друг другу ЭДС, индуктированные ими в сторонах секций различных полюсных делений или целых их групп.

Аналогичный результат может быть достигнут в пределах каждого отдельного полюса, если на одной его половине сместить наконечник в одну сторону, а на другой — в противоположную; технически это может быть достигнуто за счет применения несимметричного штампа с поворачиванием выштамповок на одной половине полюса налево, а на другой — направо (рис. 4.29). Можно составлять наконечник из четырех частей, как изображено на рис. 4.30, и более, что в пределе даст наконечник со скошенными краями (рис. 4.31); однако чем дальше идти этим путем, тем бо́льшими становятся технические трудности его выполнения. При



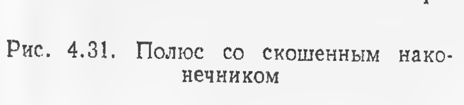
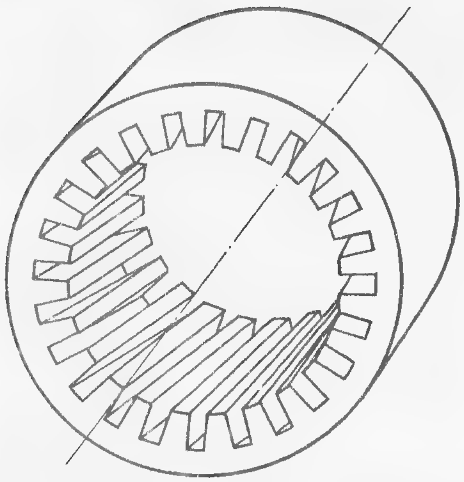


Рис. 4.31. Полюс со скошенным наконечником


Рис. 4.32. Скос пазов якоря



составлении полюса из двух половин скос обеспечивается без дополнительных трудностей одним штампом; в случае четырех частей потребуются два штампа — один для крайних пакетов стали полюса, а другой — для средних, но получить скошенные края можно только механической обработкой полюса, собранного из листов, штампованных с большей шириной наконечника. Известны случаи, когда в крупных многополюсных машинах скос краев полюсных наконечников достигался просто косой установкой полюсов обычного устройства.

Тот же самый эффект может быть получен другим путем — скосом пазов сердечника якоря (рис. 4.32), что нередко применяется в машинах относительно умеренных мощностей; в более крупных машинах это встречает затруднения, возрастающие с их размерами.

В обоих случаях график распределения МДС в каждом отдельном поперечном сечении машины сохраняет свою ступенчатую форму, но суммирование или, правильнее сказать, интегрирование его вдоль паза превращает каждую ступень в отрезок наклонной прямой; при правильном подборе скоса концы всех таких отрезков сходятся и они образуют непрерывную ломаную линию — не что иное, как график МДС гладкой обмотки данного вида (например, с данным укорочением шага), т. е. при увеличении числа пазов на полюс и фазу до бесконечности. Одновременно несколько понижаются амплитуды всех гармонических, так как скос равноценен укорочению шага на половину соответствующей ему дуги.

Если в кривой поля индуктора содержится гармоническая порядка ν, то для исключения ее из кривой индуктированной ЭДС, например, при полюсных наконечниках, составленных из двух половин по рис. 4.29, достаточно, чтобы фазы ЭДС этого порядка под обеими половинами полюса были противоположны. Если полюсный наконечник очерчен дугой, концентричной с активной поверхностью якоря, то для этого нужно, чтобы половины наконечника были смещены на угол

$$\gamma = \frac{1}{2}\,\frac{2\pi}{\nu} = \frac{\pi}{\nu}.$$

Погасить таким способом полностью сразу две гармонические близких порядков, например зубцовые, невозможно, но они будут значительно ослаблены, если этому углу придать промежуточное значение, в данном случае соответствующее среднему между двумя зубцовыми порядками $\nu_{z\,\text{ср}} = 2mq$, следовательно,

$$\gamma = \pi/(2mq) = \alpha/2.$$

Очерчивание полюсного наконечника дугой, не концентричной с активной поверхностью якоря, несколько нарушает это равенство, но не в такой степени, чтобы им нельзя было практически пользоваться. При скосе пазов или краев полюсных наконечников такой угол должен быть между серединами половин скошенных линий, следовательно, на всей длине они должны быть скошены вдвое больше — на целое зубцовое деление α.

Все рассмотренное до сих пор касалось предотвращения индуктирования гармонических зубцовых порядков ЭДС в обмотке якоря за счет их содержания в кривой поля индуктора. Что касается собственного поля обмотки якоря при наличии в ней тока, то его гармонические зубцовых порядков наравне с прочими гармоническими перемещаются по отношению к самой обмотке со скоростями, обратно пропорциональными порядкам, так что индуктируют ЭДС основной частоты, а не зубцовой. Она не является полезной, так как создающие ее составляющие магнитного потока не образуют рабочего вращающего момента, но лишь вызывают поверхностные потери на противоположной части машины, а в самой обмотке определяют часть ее индуктивного сопротивления. И то, и другое не зависит от скоса или какого-либо равноценного ему мероприятия и не может быть устранено никакими средствами, касающимися устройства обмотки.

До сих пор здесь не делалось никаких предположений относительно наличия пазов с обмоткой или без нее на противоположной части машины; однако такие пазы существуют в большинстве машин переменного тока, лишь изредка встречаются синхронные машины с гладкими полюсными наконечниками без успокоительных клеток или асинхронные двигатели с массивными роторами без пазов. За исключением индукторов неявнополюсных синхронных машин, такие пазы обычно делаются закрытыми или полузакрытыми, так что провалы в поле от них относительно невелики; но при наличии токов в обмотках, заложенных в эти пазы, каждому из последних будет соответствовать ступенчатое изменение МДС, а вместе с ней — и индукции.

Зубцовые деления на обеих частях машины не могут очень сильно различаться, но они не должны быть и слишком близкими друг к другу, так как иначе это благоприятствовало бы индуктированию гармонических зубцовых порядков в обмотках обеих частей; то же самое в немногим меньшей степени имело бы место и при кратностях зубцовых делений, из которых может идти речь только о 2 : 1. Таким образом, соотношение зубцовых делений

должно лежать где-то между 1 и 2. В действительности это соотношение обычно лежит в еще более тесных пределах, причем и внутри их не сплошь, а с определенными разрывами, так как при некоторых его значениях возникает опасность так называемого прилипания, когда при пуске машины из неподвижного состояния развиваемый начальный вращающий момент недостаточен для преодоления сил притяжения между зубцами статора и ротора, а при других значениях наблюдается гудение сердечника, иногда очень резкое. Все это проявляется особенно в асинхронных машинах с их малыми зазорами, но и синхронные машины от них не свободны.

Если в полюсных наконечниках индуктора имеются пазы с успокоительной или пусковой клеткой, то скос их краев в любой форме будет бесполезен и борьба с гармоническими в кривой ЭДС якоря, возникающими при неудачном выборе шага этих пазов, возможна практически только путем применения соответствующего скоса пазов якоря (или упомянутой выше косой установки полюсов обычного устройства). В принципе пригодно исполнение полюсных наконечников по рис. 4.29, в каждой половине которых заложена своя клетка со сдвигом между обеими на половину шага зубца; однако технически выполнить такую конструкцию затруднительно, даже если короткозамыкающие пластины в промежутке между половинами наконечника сделать общими для обеих клеток.

Вредное влияние зубчатости той или другой части машины проявляется тем резче, чем относительно меньше зазор между ними; в асинхронных машинах, где отношение зазора к полюсному делению понижается до 1/300—1/500 и менее, оно особенно сильно — все неравномерности очертания сердечника отчетливо передаются с одной части на другую. В синхронных машинах это отношение значительно возрастает, особенно в турбогенераторах, где оно доходит до 1/50—1/30, а в наиболее крупных единицах — до 1/20 и даже 1/15; поэтому до активной поверхности противоположной части машины доходит влияние гармонических только относительно низких порядков, а более высокие в значительной степени ослабляются. Можно считать, что в зазоре практически погашаются все гармонические, у которых длина волны меньше зазора; отсюда следует, что в машинах с большим зазором, обычно имеющих большие числа пазов на полюс и фазу, следовательно, довольно высокие порядки зубцовых гармонических даже первой серии, нет надобности принимать какие-либо специальные меры для подавления этих гармонических. Действительно, практика показывает, что кривая ЭДС таких машин отличается большой чистотой; наличие гармонических зубцовых порядков не только не обнаруживается визуально при осмотре осциллограмм, но и почти не выявляется при исследовании напряжения при помощи специальной аппаратуры — анализаторов гармонического состава.

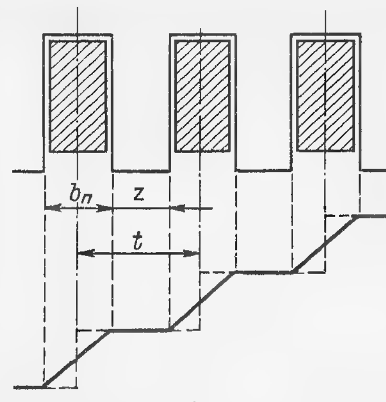


Рис. 4.33. Изменение МДС над открытым пазом

Скос оказывает некоторое уменьшающее влияние и на основную волну ЭДС, но в незначительной степени. Мерой этого влияния может служить отношение коэффициентов распределения для основной волны гладкой обмотки и обмотки с данным числом пазов на полюс и фазу; так, например, если обмотка имеет $q = 2$, то коэффициент, учитывающий влияние скоса, будет равен

$$k_k = 0{,}9549/0{,}9659 = 0{,}9886,$$

т. е. ущерб, нанесенный основной волне, немногим более 1 %, а при более высоких числах пазов на полюс и фазу — еще меньший.

Графики МДС вроде рассмотренных выше построены как бы для обмоток в пазах с бесконечно узким шлицем, которому и должны соответствовать отвесные участки этих графиков, хотя в действительности, особенно при открытых пазах, следовало бы учитывать изменение МДС при перемещении от одного края паза к другому, как показано на рис. 4.33. Не представляет особой сложности вывести зависимость коэффициентов распределения, учитывающую это изменение для гармонических любых порядков, однако на самом деле построенные таким образом графики МДС изображали бы магнитное поле в зазоре только для случая отсутствия зубцов сердечника якоря, изготовленного из ферромагнитного материала. За исключением машин, которые должны работать с охлаждением индуктора, обеспечивающим сверхпроводимость его обмотки, и для которых не нужен магнитный сердечник якоря (пока еще не принявших установившиеся формы), в реальных электрических машинах для перехода от графика МДС к кривой распределения индукции в зазоре следует учесть влияние магнитного сопротивления пазов, создающих провалы в кривой индукции наподобие представленных на рис 3.7, что, однако, уже выходит за пределы содержания этой книги.

Если t — зубцовое деление якоря, а $b_п$ — ширина отверстия его паза, то при бесконечно малом значении последней коэффициент распределения обмотки должен быть принят по выражению (3.25) равным

$$k_{q\nu} = \frac{\sin 30°\nu}{q \sin \dfrac{30°\nu}{q}};$$

если же ширина паза равна зубцовому делению, т. е. зубца вообще нет, то значение коэффициента распределения должно быть принято по выражению (3.26):

$$k_{q\nu} = \frac{1,9099}{\nu} \sin 30°\nu.$$

Отсюда следует, что при промежуточных значениях отношения ширины отверстия паза к зубцовому делению для коэффициента распределения можно написать

$$k_{q\nu} = \frac{t - b_п}{t} \frac{\sin 30°\nu}{q \sin \frac{30°\nu}{q}} + \frac{b_п}{t} \frac{1,9099}{\nu} \sin 30°\nu.$$

Громоздкость этого выражения вряд ли окупается его практической полезностью, но оно может найти применение при исследовании полей в электрических машинах.

Глава пятая

ОБМОТКИ С ДРОБНЫМИ ЧИСЛАМИ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ

5.1. ПОЛУЧЕНИЕ ДРОБНЫХ ЧИСЕЛ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ

Выше было отмечено, что условием выполнимости симметричных обмоток многофазного тока с целыми числами пазов на полюс и фазу является делимость общего числа пазов Z на произведение числа фаз m и числа полюсов $2p$:

$$q = \frac{Z}{2pm} = \text{целое}. \qquad (5.1)$$

Однако в ряде случаев результат этого деления, дающий число пазов на полюс и фазу, приходится принимать дробным. Причины этого могут быть различны; основными из них являются следующие:

а) необходимость выполнять машины с разными числами пар полюсов на сердечниках с одним и тем же общим числом пазов Z; так, это может быть целесообразным в сериях машин относительно небольшой мощности, у которых листы активной стали штампуются компаундными штампами, вырубающими сразу все пазы. По причине значительной стоимости таких штампов их отдельное изготовление для каждого числа пар полюсов может оказаться невыгодным;

б) стремление получить какие-либо электрические и электромагнитные свойства обмоток, недостижимые при целых числах пазов на полюс и фазу, например подавление некоторых высших гармонических;

в) выполнение обмоток с переключениями на несколько различных чисел пар полюсов; некоторые из них при этом могут получиться не иначе как с дробными числами пазов на полюс и фазу;

г) невозможность получения при целом числе пазов на полюс и фазу того числа последовательно соединенных витков в каждой фазе, которое требуется для данного номинального напряжения; это встречается в крупных машинах с одновитковыми секциями, когда изменение основных размеров машины, при котором число пазов на полюс и фазу могло бы быть сделано целым, не представляется возможным.

Дробное число пазов на полюс и фазу может быть представлено в виде

$$q = b + \frac{c}{d}, \qquad (5.2)$$

где b, c и d — некоторые целые числа. Из них целая часть b может иметь любые значения, в том числе и нуль, но практически никогда не превосходит предела, ограниченного немногими единицами; числитель c способен принимать значения от 1 до $d - 1$; что касается знаменателя d, то он представляет наименьшее число p пар полюсов, при котором может быть выполнена однослойная обмотка с данным числом пазов на полюс и фазу q. Действительно, по определению

$$q = \frac{Z}{2pm} = b + \frac{c}{d},$$

откуда

$$\frac{Z}{2m} - pb = p\frac{c}{d}; \qquad (5.3)$$

поскольку левая часть представляет целое число, правая тоже должна быть целым числом, следовательно, p равно или кратно d. При этом, если c и d имеют общие множители, то не следует спешить производить сокращение на них; смысл этого выяснится несколько позже.

Число сторон секций всякой обмотки с многовитковыми секциями должно быть четным; следовательно, для того чтобы однослойная обмотка заполняла все пазы, общее их число Z должно быть четно, иначе некоторое число пазов останется незаполненным. Поскольку по условиям симметричности обмоток Z должно делиться на число фаз, то при нечетных значениях Z и m в принципе тоже возможны симметричные однослойные обмотки, но в них останутся незаполненными m пазов. Обмотки с одновитковыми секциями при нечетных Z и m могут заполнять все пазы, но

тогда неизбежно начала и концы фаз окажутся по разные стороны машины, что представляет особый случай.

В дальнейшем обмотки с числами пар полюсов, равными d, называются *единичными* обмотками; при всяком дробном числе пазов на полюс и фазу возможны обмотки с числом пар полюсов, в любое целое число раз бо́льшим, чем для единичной обмотки. В единичной обмотке возможно только последовательное соединение всех секций, составляющих каждую фазу, но единичные обмотки, входящие в состав обмотки с кратным числом пар полюсов, могут быть соединены между собой как последовательно, так и параллельно.



Рис. 5.1. Получение обмотки однофазного тока с дробным числом пазов

Получение обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу может быть пояснено на примере рис. 5.1, где дана обмотка однофазного тока с числом пар полюсов $p = 4$, имеющая на каждом полюсном делении по два заполненных и по одному незаполненному пазу. В произвольно выбранном месте добавлена еще одна секция, так что общее число пазов Z увеличилось на два и в среднем на каждое полюсное деление приходится уже не по два, а по $2^1/_4$ заполненного паза; незаполненным по-прежнему остается на нем один паз.

Равным образом из обмотки с двумя пазами на полюс и фазу можно удалить одну секцию и соответственно уменьшить общее число пазов на два; тогда на каждое полюсное деление придется в среднем по $1^3/_4$ заполненного паза, а число незаполненных останется прежним.

Точно так же можно рассмотреть прибавление или отнятие не одной секции, а двух, трех и т. д. вплоть до $d - 1$; при этом обнаружится, что в случае $1 < c < d - 1$ это можно сделать не одним, а несколькими способами — как на соседних полюсных делениях, так и с промежутками. Кроме того, можно было бы рассмотреть случаи, когда прибавляются или отнимаются незаполненные пазы с сохранением или с изменением числа заполненных; во всех таких случаях обмотка несомненно должна приобретать новые свойства. Число возможных вариантов здесь очень велико, и его было бы немыслимо охватить, но обмотки однофазного тока с дробными числами пазов лишены серьезного практического значения и заниматься ими более подробно здесь нет необходимости.

Обмотки двухфазного тока в настоящее время если и применяются, то лишь изредка для фазных роторов асинхронных двигателей относительно небольшой мощности; по причинам, рассматриваемым в главе шестой, применение дробных чисел пазов в них нежелательно, а однослойные обмотки конструктивно очень неудобны. Поэтому не имеет смысла уделять им большее внимание.

Дробные числа пазов на полюс и фазу находят широкое применение в обмотках трехфазного тока. Начиная их рассмотрение, следует прежде всего отметить, что при любом числе фаз m знаменатель d не должен быть ему кратен, так как при этом невозможно получить симметричную обмотку. Действительно, кратность знаменателя d числу фаз m возможна только при условии, что и число пар полюсов ему кратно. Здесь могут быть два случая: числитель c либо не кратен, либо кратен числу фаз. В первом из них должна бы получиться единичная обмотка, но по условиям симметричности добавление или изъятие секций для перехода от целого числа пазов к дробному во всех фазах должно производиться одинаковым образом, т. е. в местах, равномерно распределенных по окружности; однако в таких местах всегда оказываются секции одной и той же фазы. Во втором случае можно либо сокращать, либо не сокращать числитель и знаменатель; если не сокращать, то это является возвратом к первому случаю, если же сокращать, и притом знаменатель перестанет быть кратным числу фаз, то обмотка распадется на единичные, число которых равно произведению всех множителей, на которые произведено сокращение.

Пример 5.1. Требуется выполнить обмотки трехфазного тока с числом пар полюсов $p = 6$ на сердечниках с числами пазов $Z = 102$, 96 и 90.

На первом сердечнике обмотка имела бы число пазов на полюс и фазу

$$q = Z/(2pm) = 102/(2\cdot 6\cdot 3) = 2^5/_6;$$

дробь несократима, и обмотка не может быть выполнена симметричной. На втором сердечнике

$$q = 96/(2\cdot 6\cdot 3) = 2^4/_6 = 2^2/_3;$$

дробь хотя и сократима, но в результате знаменатель все равно остается кратным числу фаз, и потому симметричная обмотка невыполнима. На третьем сердечнике

$$q = 90/(2\cdot 6\cdot 3) = 2^3/_6 = 2^1/_2;$$

в результате сокращения знаменатель перестал быть кратным числу фаз, а обмотка распадается на три единичные обмотки, каждая из которых занимает четыре полюсных деления. Теперь добавление или изъятие секций в исходной обмотке с целым числом пазов 2 или 3 нужно делать в местах, равномерно распределенных не по 12, а по 4 полюсным делениям, в которых находятся разные фазы.

В приложении 13 приведены числа пазов на полюс и фазу, осуществимые для симметричных однослойных обмоток трех-

фазного тока с заполнением всех пазов при их общих числах Z от 18 до 120 и числах пар полюсов p от 1 до 20. Из приложения видно, что некоторые числа Z очень удобны тем, что дают обмотки с целыми числами пазов на полюс и фазу при многих числах пар полюсов; все они являются произведениями степеней самых малых первоначальных чисел. Так, например, среди них выделяются числа: $36 = 2^2 \cdot 3^2$; $48 = 2^4 \cdot 3$; $72 = 2^3 \cdot 3^2$; $96 = 2^5 \cdot 3$ и т. д.; менее удобны числа: $60 = 2^2 \cdot 3 \cdot 5$; $120 = 2^3 \cdot 3 \cdot 5$; еще менее удобны такие, как $42 = 2 \cdot 3 \cdot 7$ или $84 = 2^2 \cdot 3 \cdot 7$. С другой стороны, ряд чисел пар полюсов неблагоприятен для выполнения обмоток с целыми числами пазов на полюс и фазу; особенно это относится к целым числам Z, кратным числу фаз m, т. е. в данном случае трем.

Приложение разделено по диагонали рядом единиц, ниже которого расположены числа пазов на полюс и фазу, не имеющие целой части b, т. е. представляющие правильные дроби; это значит, что секции каждой фазы находятся не на всех парах полюсных делений. Еще сравнительно недавно такие числа практически не применялись, но в последние годы к ним возник некоторый интерес благодаря попыткам их применения в крупных гидрогенераторах, чему уделено место в § 5.8.

В приложении 14 даны числа пазов на полюс и фазу, осуществимые для симметричных однослойных обмоток трехфазного тока с тремя пазами, не заполненными обмоткой, с нечетными общими числами пазов от 21 до 123 и для тех же чисел пар полюсов — от 1 до 20. Здесь наиболее удобными являются числа Z, представляющие степени трех, так как для них выполнимы обмотки со всеми числами пар полюсов, кроме кратных трем, при которых обмотки этого вида не могут существовать; все обмотки являются единичными, несмотря на то, что некоторые числа пазов на полюс и фазу неоднократно повторяются.

Числитель c учитывает как заполненные, так и незаполненные пазы; поэтому для определения общего числа секций S в каждой фазе смешанное дробное число q следует превратить в неправильную дробь, отнять от ее числителя единицу и остаток разделить на 2:

$$S = \frac{bd + c - 1}{2}. \qquad (5.4)$$

Особенного внимания заслуживают числа Z, у которых числитель c равен единице, а знаменатель d — числу полюсов $2p$; обмотки с такими числами пазов отличаются тем, что на всех парах полюсных делений имеют одинаковые числа секций в каждой фазе и этим предельно приближаются к обмоткам с целыми числами пазов на полюс и фазу.

Применение дробных чисел пазов на полюс и фазу восходит еще к тем стадиям развития электромашиностроения, когда основными способами изготовления обмоток были упомянутые в § 1.1 — впротяжку с формированием лобовых частей на самой обматываемой части машины при помощи подкладных шаблонов или способ разрезных секций, при котором половина всех лобовых частей формировалась на месте; то обстоятельство, что число различных форм лобовых частей могло быть при этом велико, не играло существенной роли. Однако когда стали отчетливо выясняться преимущества изготовления секций обмотки отдельно от машины, переход к равносекционным обмоткам, особенно двухслойным, распространился и на обмотки с дробными числами пазов на полюс и фазу.

5.2. РАВНОСЕКЦИОННЫЕ ОБМОТКИ С ДРОБНЫМИ ЧИСЛАМИ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ

Симметричная обмотка многофазного тока может быть выполнена при любом общем числе пазов Z, лишь бы только это последнее было кратно числу фаз, а знаменатель дробной части не был ему кратен.

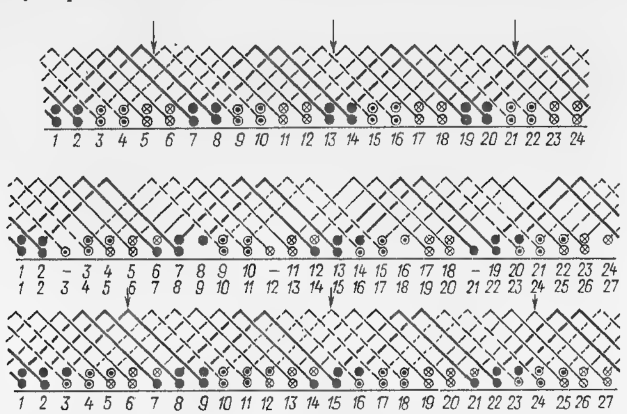


Рис. 5.2. Получение обмотки трехфазного тока с дробным числом пазов способом добавления секций

Процесс получения двухслойной обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу из обмотки с целым числом может быть представлен так же, как это было рассмотрено в § 5.1, в двух вариантах: либо добавлением в каждой фазе c секций к обмотке с целым числом пазов на полюс и фазу, равным b, либо отнятием $d - c$ секций от обмотки с числом пазов, равным $b + 1$. Первый из них представлен на рис. 5.2, где показано получение обмотки с $q = 2^1/_4$ из обмотки с двумя пазами на полюс и фазу путем добавления по одной секции в каждой фазе, а второй — на рис. 5.3, где такая же обмотка получается из обмотки с тремя пазами на полюс и фазу путем отнятия трех секций от каждой фазы. В обоих случаях шаг секций в исходных обмотках принят одинаковым и равным $y = 6$ и сохраняется после преобразования.

Как добавление, так и удаление секций во всех фазах должно быть произведено одинаково, как того требует их симметричность.

На рис. 5.2 стрелками намечены места, в которых должно быть добавлено по одной секции; эти места расположены на одинаковых расстояниях друг от друга. Чтобы разместить секции, обмотку нужно в этих местах раздвинуть; при этом стороны секций одного какого-либо слоя, например нижнего, остаются на своих местах, а стороны другого перемещаются в соседние пазы. Поскольку общее число пазов изменяется, то должна быть изменена и их нумерация; это отмечено двойным рядом номеров на промежуточной стадии преобразования.

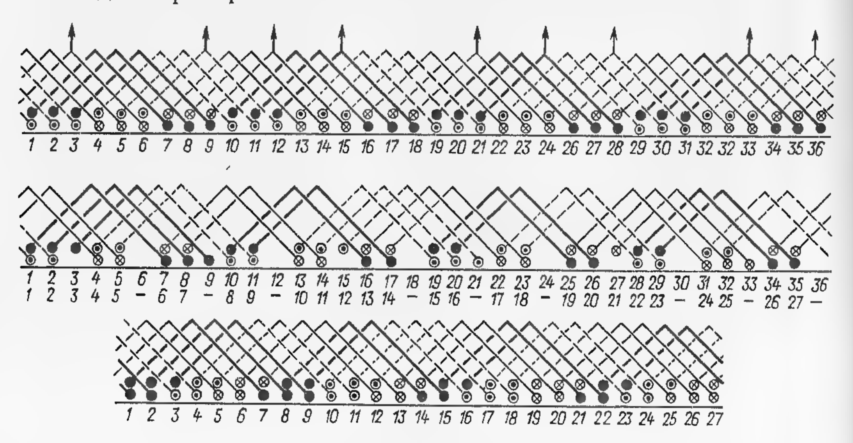


Рис. 5.3. Получение обмотки трехфазного тока с дробным числом пазов способом удаления секций

На рис. 5.3 стрелками отмечены секции, подлежащие удалению; как и в предыдущем случае, на своих местах остаются стороны секций, лежащие на дне пазов, после чего обмотка сдвинута так, чтобы не осталось пустых мест в пазах, и это отмечено двойной нумерацией пазов на промежуточной стадии. Последнее преобразование получилось сложнее предыдущего; но если бы требовалось получить обмотку с числом пазов $q = 2^3/_4$, то по первому способу пришлось бы добавлять по три секции в каждой фазе, а по второму — отнимать только по одной. Это обстоятельство стало бы существенным при более высоких значениях знаменателя дроби d, но в действительности прибегать к таким преобразованиям не приходится, так как схема обмотки с любым дробным числом пазов может быть получена более простым способом.

В рассмотренном примере обмотка со знаменателем дроби $d = 4$ выполнена на две пары полюсов, а не на четыре, как следовало бы из помещенной ниже табл. 5.1; это происходит потому, что при прочих равных условиях число секций двухслойной обмотки вдвое больше, чем однослойной, что и позволяет полностью завершить их распределение на вдвое меньшем числе полюсных делений. То же самое происходит и при нечетных значениях знаменателя d, но сама его нечетность требует двукратного повторения распределения секций для получения единичной обмотки.

По существу, следовало бы исключить из рассмотрения нечетные значения знаменателя d; при этом условии все рассуждения для дробных чисел пазов при всяких числах пар полюсов можно было бы проводить вполне единообразно, и только привычка заставляет делать здесь уступку установившимся представлениям и вводить в рассмотрение нечетные значения знаменателя вместе с обусловленными этим усложнениями правил, которые ниже будут встречаться неоднократно.

Выбор начала мест добавления или удаления секций на рис. 5.2 и 5.3 совершенно произволен; но в любом случае, поскольку все секции единичной обмотки соединены последовательно, это не отразится на свойствах обмотки. Очевидно, что это относится ко всем обмоткам с числителями дроби, равными единице или $d - 1$; но как только числитель примет одно из значений $1 < c < d - 1$, так сразу же обнаружится, что распределение секций по полюсным делениям может быть различным, и это не может не отражаться на свойствах обмоток.

Пусть, например, число пазов на полюс и фазу $q = 1^2/_5$; это значит, что из каждых пяти полюсных делений на трех расположено по одной секции, а на двух — по две. Это может быть сделано по-разному — либо на соседних полюсных делениях, либо с промежутком. Не играет роли, с какого именно полюсного деления начинается такое распределение, так как оно может быть циклически продолжено сколь угодно. Здесь могут существовать два варианта распределения: 2 2 1 1 1 или 2 1 2 1 1. На следующих пяти полюсных делениях можно было бы применить и иное распределение, нежели на предыдущих, но это только бесполезно осложнит порядок соединений секций.

При следующем значении числителя, т. е. при $q = 1^3/_5$, получится наоборот — на двух полюсных делениях по одной секции и на трех по две; но число вариантов распределения от этого не изменится — их будет по-прежнему два: 1 1 2 2 2 и 1 2 1 2 2. Они отличаются от предыдущих только тем, что единицы и двойки обменялись местами. То же самое будет при любых двух значениях числителя c_1 и c_2, связанных соотношением $c_2 = d - c_1$: числа вариантов распределения при них одинаковы.

При значении знаменателя $d = 7$ числитель $c = 2$ дает уже не два, а три варианта распределения:

1.	2 2 1 1 1 1 1
2.	2 1 2 1 1 1 1
3.	2 1 1 2 1 1 1

Действительно, если продолжить такой переход от одного варианта к другому, то дальше получилось бы

2 1 1 1 2 1 1,

но этот вариант ничем не отличается от предыдущего. Как и раньше, варианты для значения числителя $c = 5 = 7 - 2$ могут быть получены заменой единиц двойками и наоборот.

Однако числитель $c = 3$ дает уже нечто новое; для выяснения его сущности удобнее перенести начало распределения так, чтобы в середине ряда находились группы из большего числа секций:

1. 1 1 2 2 2 1 1
2. 1 2 1 2 1 2 1
3. 2 1 1 2 1 1 2
4. 1 1 2 2 1 2 1
5. 1 2 1 2 2 1 1

Первые три из этих вариантов отличаются тем, что распределение симметрично относительно середины ряда, а в последних двух симметричность нарушена и не может быть восстановлена никаким переносом начала распределения. С этим связано определенное ухудшение свойств обмотки; поэтому все дальнейшее изложение ограничивается только такими вариантами распределения секций по полюсным делениям, которые могут быть представлены симметричными относительно некоторой точки. Несущественно, какое число секций соответствует этой точке — большее, как в рассмотренном случае, или меньшее, как было бы удобнее представить при следующем значении числителя $c = 4$, или даже промежуток между двумя группами с одинаковыми числами секций; важно, чтобы симметричность вообще могла быть отыскана.

В табл. 5.1 даны числа электрически различных симметричных вариантов распределения секций по полюсным делениям обмоток трехфазного тока со знаменателями d от 2 до 16 и числителями c от нуля до d; такое расширенное представление числителя включает в число рассматриваемых также обмотки с теми целыми числами пазов на полюс и фазу, между которыми заключены все дробные. Из таблицы видно, что для каждого значения знаменателя d числа вариантов представлены в виде двух рядов биномиальных коэффициентов; один ряд охватывает нечетные значения числителя c, а другой — четные.

При нечетных значениях знаменателя d степени биномов, к которым относятся ряды коэффициентов, одинаковы и равны $(d - 1)/2$, а при четных d степень бинома для четных значений числителя c равна $d/2$, а для нечетных $d/2 - 1$. Согласно предшествовавшему изложению числа вариантов, равноотстоящие от концов ряда, должны быть всегда одинаковы, что соответствует свойствам рядов биномиальных коэффициентов. На этом же основании при нечетных значениях знаменателя в середине ряда находятся два одинаковых наибольших значения числа вариантов,

Таблица 5.1. **Числа электрически различных вариантов распределения сторон секций по полюсным делениям обмоток трехфазного тока с дробными числами пазов на полюс и фазу**

Знаменатель d	Числитель c																	Всего
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
2	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3
	1	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
4	—	1	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6
	1	—	2	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
5	—	1	—	2	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8
	1	—	2	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
7	—	1	—	3	—	3	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16
	1	—	3	—	3	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
8	—	1	—	3	—	3	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	24
	1	—	4	—	6	—	4	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	
10	—	1	—	4	—	6	—	4	—	1	—	—	—	—	—	—	—	48
	1	—	5	—	10	—	10	—	5	—	1	—	—	—	—	—	—	
11	—	1	—	5	—	10	—	10	—	5	—	1	—	—	—	—	—	64
	1	—	5	—	10	—	10	—	5	—	1	—	—	—	—	—	—	
13	—	1	—	6	—	15	—	20	—	15	—	6	—	1	—	—	—	128
	1	—	6	—	15	—	20	—	15	—	6	—	1	—	—	—	—	
14	—	1	—	6	—	15	—	20	—	15	—	6	—	1	—	—	—	192
	1	—	7	—	21	—	35	—	35	—	21	—	7	—	1	—	—	
16	—	1	—	7	—	21	—	35	—	35	—	21	—	7	—	1	—	384
	1	—	8	—	28	—	56	—	70	—	56	—	28	—	8	—	1	

Примечание. Целым числам пазов на полюс и фазу, равным b, соответствует столбец 0; целым числам, равным $b + 1$, соответствуют крайние правые единицы в строках.

если $(d-1)/2$ четно, и четыре, если оно нечетно. Наконец, при четных значениях знаменателя наибольшее значение числа вариантов находится в середине ряда (т. е. при $c = d/2$) только тогда, когда знаменатель кратен четырем; в противном случае два одинаковых наибольших значения находятся по обе стороны от середины, при $c = d/2 \pm 1$.

При нечетных значениях знаменателя d, с которыми практически приходится иметь дело, все варианты распределения секций представляют единичные обмотки, потому что числитель и знаменатель несократимы. Действительно, поскольку знаменатель не должен быть кратен трем, первым его составным нечетным значением является $25 = 5^2$; оно уже настолько велико, что его применение сомнительно. Тем более это относится к следующим двум: $35 = 5 \cdot 7$ и $49 = 7^2$. Однако при четных значениях d, поскольку около половины значений числителя тоже четно, возникает возможность сокращения на два или даже иногда на некоторую степень двух; в таких случаях обмотка уже не является единичной. Однако при сокращении могут быть утеряны варианты распределения, отличающиеся теми или иными достоинствами и являющиеся единичными обмотками.

Пример 5.2. Требуется выполнить обмотку с числом пар полюсов $p = 4$ на сердечнике с числом пазов $Z = 36$.

После сокращения числителя и знаменателя на число фаз 3 число пазов на полюс и фазу будет

$$q = \frac{26}{2 \cdot 4 \cdot 3} = \frac{12}{8} = 1\frac{4}{8}.$$

Если произвести сокращение на общие множители, в данном случае на $2^2 = 4$, то в результате получится $q = 1^1/_2$ с единственным вариантом распределения секций: 2 1 2 1 2 1 2 1; это представляет четырехкратное повторение единичной двухполюсной обмотки с $q = 1^1/_2$. Такая обмотка имеет очевидное достоинство — в ней можно применить не только последовательное соединение всех секций каждой фазы, но и параллельное с числом ветвей 2 или даже 4; о других достоинствах или недостатках судить пока преждевременно.

Если произвести сокращение только на 2, т. е. принять $q = 1^2/_4$, то можно будет добавить еще один вариант распределения секций: 2 2 1 1 2 2 1 1; однако число возможных параллельных ветвей в нем уже только 2. И это представляет не единичную обмотку, а двукратное повторение четырехполюсной обмотки с $q = 1^2/_4$.

Если, наконец, вовсе не производить сокращение, то согласно табл. 5.1 число вариантов распределения возрастет до шести — к двум уже рассмотренным добавляются еще четыре:

3.	2 2 2 2 1 1 1 1
4.	2 2 1 2 2 1 1 1
5.	2 2 1 2 1 1 2 1
6.	2 2 2 1 1 2 1 1

Все они являются единичными, и потому в них возможно только последовательное соединение секций каждой фазы, что, конечно, не является их достоинством по сравнению с предыдущими; что же касается положительных качеств, то пути их определения, а значит, и выбора того или иного варианта будут рассмотрены ниже.

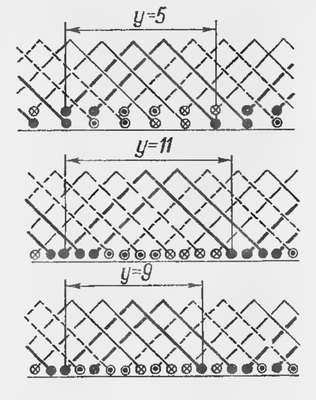


Рис. 5.4. Преобразование двухслойной обмотки с дробным числом пазов в однослойную равносекционную

Нет никаких препятствий к тому, чтобы превратить двухслойную обмотку с каким угодно числом пазов на полюс и фазу в однослойную равносекционную, применив уже знакомый прием удвоения числа пазов: в промежутках между каждыми двумя пазами двухслойной обмотки помещается еще по одному пазу, после чего стороны секций, лежащие в верхнем слое, перемещаются в эти новые пазы, а стороны, лежащие в нижнем слое, остаются на своих местах (рис. 5.4).

Так как общее число пазов Z удвоилось, то должно удвоиться и число пазов на полюс и фазу q. В частности, если знаменатель дроби был равен двум, то дробное число пазов превращается в целое. В самом общем виде, если число пазов на полюс и фазу исходной двухслойной обмотки было согласно выражению (5.2) равно

$$q = b + c/d,$$

то после удвоения оно превратится в

$$q' = 2q = 2b + 2c/d = b' + c'/d. \tag{5.5}$$

Если в исходной обмотке $c < d/2$, то $b' = 2b$; если же $c \geqslant d/2$, то $b' = 2b + 1$. В первом случае $c' = 2c$, во втором же $c' = 2c - d$; здесь имеются две возможности: если d нечетно, то вне зависимости от четности или нечетности c в результате получится непременно нечетное значение c', но если d четно, то и c' тоже четно.

Таким образом, однослойные равносекционные обмотки, полученные из двухслойных способом удвоения числа пазов, могут иметь всякие числа пазов на полюс и фазу, свойственные двухслойным обмоткам; нечетные знаменатели при этом сохраняются, а четные становятся вдвое меньшими. При этом, если исходная обмотка была единичной, то и полученная из нее однослойная обмотка тоже будет единичной. Отмеченная ранее несимметричность распределения сторон секций по пазам соседних полюсных делений, характерная для однослойных равносекционных обмоток с чередующимися секциями при нечетных числах пазов на полюс и фазу и шаге, отличном от диаметрального, может рассматриваться как следствие образования этих обмоток из двухслойных. Ниже будет показано, что такие обмотки с целыми нечетными числами пазов на полюс и фазу обладают некоторыми свойствами, специфичными для обмоток с дробными числами пазов.

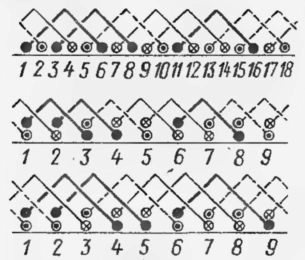


Рис. 5.5. Преобразование однослойной равносекционной обмотки в двухслойную

Шаг y двухслойной обмотки может быть как четным, так и нечетным; но каким бы он ни был, при удвоении числа пазов и переносе сторон секций из верхнего слоя в соседние, вновь образованные пазы шаг станет нечетным независимо от того, как сделан перенос — в сторону укорочения или удлинения, как это и должно быть для однослойной равносекционной обмотки.

Пример 5.3. Ряд двухслойных обмоток имеет следующие числа пазов на полюс и фазу: целая часть $b = 1$, в дробной части знаменатель d принимает последовательно все значения, кроме кратных трем, а числитель c — все значения, которые он может иметь при данном знаменателе d. Все эти обмотки превращаются в однослойные равносекционные путем удвоения общего числа пазов; требуется определить их числа пазов на полюс и фазу.

1. При $d = 2$ возможно только одно число пазов на полюс и фазу $q = 1^1/_2$; его удвоение дает целое число $q' = 3$.

2. При $d = 4$ могут быть три числа: $q = 1^1/_4$, $1^2/_4$ и $1^3/_4$. Они дают числа $q' = 2^2/_4$, 3 и $3^2/_4$. Попутно возникает вопрос: из какой двухслойной обмотки может быть получена однослойная с числом пазов $q' = 1^1/_2$? Оказывается, что вполне правильным является формальный ответ на этот вопрос: $q = {}^3/_4$; в этом можно убедиться, проделав обратную операцию: превратив однослойную обмотку с $q' = 1^1/_2$ в двухслойную, собрав по два ее паза в один, как показано на рис. 5.5, что может быть сделано двумя способами.

3. При $d = 5$ возможны четыре числа: $q = 1^1/_5$, $1^2/_5$, $1^3/_5$ и $1^4/_5$. Первые два из них дают $q' = 2^2/_5$ и $2^4/_5$, а последние $q' = 3^1/_5$ и $3^3/_5$. Аналогично предыдущему такие числа, как $1^1/_5$ и $1^3/_5$, могут быть получены из чисел без целой части $q' = {}^3/_5$ и ${}^4/_5$; вопрос о том, как могут быть получены числа $q' = 1^2/_5$, $1^4/_5$ и т. д., станет ясен ниже в п. 6.

4. При $d = 7$ возможны шесть чисел: $q = 1^1/_7$, $1^2/_7$, $1^3/_7$, $1^4/_7$, $1^5/_7$ и $1^6/_7$; удвоение числа пазов дает $q' = 2^2/_7$, $2^4/_7$, $2^6/_7$, $3^1/_7$, $3^3/_7$ и $3^5/_7$.

5. При $d = 8$ шесть из семи возможных значений числителя c дают четные значения числителей c', а одно, именно $c = 4$, дает целое число пазов $q' = 3$.

6. При $d = 10$, как и в предыдущем случае, все значения числителя c дают четные значения числителя c', кроме $c = 5$, дающего целое число $q' = 3$. Отсюда следует, что числа $q' = 1^2/_5 = 1^4/_{10}$ и $1^4/_5 = 1^8/_{10}$ могут быть получены из чисел $q = {}^7/_{10}$ и ${}^9/_{10}$; соответственно числа $q' = 1^2/_7$, $1^4/_7$ и $1^6/_7$ — из чисел $q = {}^9/_{14}$, ${}^{11}/_{14}$, ${}^{13}/_{14}$ и т. д.

Выше было отмечено, что двухслойные обмотки могут иметь как четные, так и нечетные общие числа пазов Z и в обоих случаях все пазы заполняются сторонами секций обмотки; при удвоении числа пазов последнее всегда становится четным. Отсюда следует, что в однослойных равносекционных обмотках не могут быть применены числа пазов, содержащиеся в приложении 14; три не заполненных обмоткой паза нарушали бы основной принцип построения таких обмоток — укладку левых сторон секций в пазы, например, нечетной нумерации, а правых — четной.

5.3. ЭДС ПРИ ДРОБНЫХ ЧИСЛАХ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ

Как уже отмечалось, дробные числа пазов на полюс и фазу находят применение главным образом в обмотках трехфазного тока, которыми достаточно ограничить их рассмотрение; получаемые в его результате закономерности могут быть распространены на обмотки с иным числом фаз, например $m = 6$.

Двухслойная обмотка с дробным числом пазов на полюс и фазу может быть получена уже при наименьшем числе пар полюсов $p = 1$. В этом случае знаменатель дроби может иметь только одно значение $d = 2$, следовательно, числитель, если дробь смешанная, — тоже одно: $c = 1$; однако целая часть b ограничена лишь пределом общего числа пазов Z. Свойства обмотки зависят от этой последней количественно, но не качественно, и потому рассмотрение можно начать с простейшего случая $b = 1$. Упрощенная круговая схема такой обмотки представлена на рис. 5.6.

Если из центра этой схемы направить лучи на все пазы обмотки и отложить на них одинаковые отрезки по числу сторон секций в пазах, то они будут представлять векторы основной волны ЭДС, индуктированных в этих сторонах двухполюсным полем. Чтобы не загромождать рисунок, это сделано только для одной фазы, причем векторы ЭДС сторон секций одного полюсного деления изображены сплошными линиями, а другого — штриховыми.

Если теперь повернуть на 180°, например, векторы, нанесенные штриховой линией, то получится пучок, вид которого будет определяться укорочением шага секций. Как было показано в отношении обмоток с целыми числами пазов на полюс и фазу, этот пучок может быть разбит на два пучка одинакового состава и вида, но повернутых друг относительно друга на угол, соответствующий укорочению шага. В состав каждого из них будут входить векторы, относящиеся к разным полюсным делениям, причем в неодинаковых числах, поскольку число векторов в каждом пучке нечетно; при всех возможных укорочениях шага этот состав будет оставаться неизменным. Им определяются свойства обмотки по отношению к магнитному полю, зависящие от распределения сторон секций по пазам и описываемые системой коэффициентов распределения k_{qv}. Чтобы сосредоточить внимание только на этих свойствах, можно заменить данную двухслойную обмотку двумя однослойными,

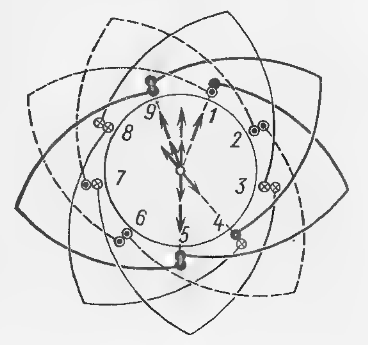


Рис. 5.6. Двухполюсная обмотка с дробным числом пазов на полюс и фазу

как это делалось уже не раз, и рассматривать лишь одну из них, соответствующую какому-либо одному слою, как показано на рис. 5.7.

Не встречавшейся до сих пор особенностью такой обмотки является то, что число сторон секций в ней нечетно, вследствие чего начала и концы фаз оказываются лежащими по разные стороны машины; оценить влияние этого обстоятельства на свойства обмотки можно будет только несколько ниже. Пучок векторов ее ЭДС имеет вид, по форме вполне соответствующий обмотке с целым числом пазов на полюс и фазу $q' = 3$, с той лишь разницей, что у последней на каждом луче лежит по два вектора ЭДС, а у обмотки с $q = 1^1/_2$ — только по одному; одинаковость формы свидетельствует о равенстве коэффициентов распределения, по крайней мере для основной волны.

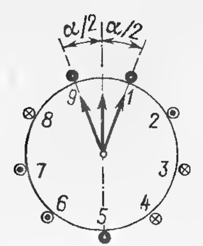


Рис. 5.7. Получение условной однослойной обмотки

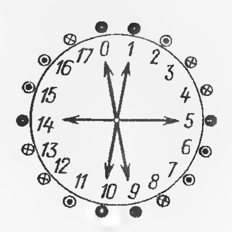


Рис. 5.8. Условная обмотка с $q = 1^1/_2$ и ее первоначальная звезда векторов ЭДС

Целое число пазов на полюс и фазу $q' = 3$ представляет числитель неправильной дроби

$$q = \frac{bd + c}{d} = \frac{1 \cdot 2 + 1}{2} = \frac{3}{2};$$

такая закономерность имеет место при любом дробном числе пазов на полюс и фазу, однако при более высоких значениях знаменателя d не всегда такая *условная* обмотка равноценна некоторой однослойной обмотке — многие из вариантов распределения сторон секций по пазам различных полюсных делений приводят к более сложным условным обмоткам.

Ближайшим бо̀льшим значением знаменателя дроби является $d = 4$; при нем единичная двухслойная обмотка должна иметь число пар полюсов $p = d/2 = 2$. На рис. 5.8 представлено распределение сторон секций одного слоя четырехполюсной обмотки с $q = 1^1/_2$; но если, как и раньше, из центра окружности направить векторы на все пазы, то они будут представлять ЭДС, индуктированные не четырехполюсным, а по-прежнему двухполюсным полем. Такая звезда векторов в дальнейшем будет называться *первоначальной*.

При целых числах пазов на полюс и фазу, когда стороны секций двухслойной обмотки распределены на всех полюсных делениях одинаковым образом, поле с меньшим числом пар полюсов не может индуктировать в обмотке никакой ЭДС, так как алгебраическая сумма мгновенных значений ЭДС сторон секций в любой момент времени равна нулю; многоугольник, составленный из векторов этих ЭДС, всегда правильный и замкнутый. Но при дробных числах пазов стороны секций располагаются на различных полюсных делениях неодинаковым образом и в неодинаковом числе, многоугольник, составленный из всех векторов ЭДС данной фазы, не будет замкнутым и, следовательно, в обмотке должна индуктироваться некоторая ЭДС. Это в равной степени относится и к двухслойной обмотке, и к той условной однослойной, которой она заменена в целях рассмотрения коэффициентов распределения.

ЭДС, индуктированная двухполюсным полем, имеет меньшую частоту, чем индуктированная полем с числом пар полюсов, соответствующим данной обмотке, т. е. является *низшей* гармонической ЭДС. В данном случае эта гармоническая имеет порядок $\nu = 1/2$; ясно, что при всяком другом числе пар полюсов обмотки p ее порядок будет $\nu = 1/p$. Двухполюсное поле помимо своей основной волны может содержать гармонические высших порядков; если эти порядки кратны p, то такие гармонические одновременно являются высшими гармоническими *целых* порядков для поля с p парами полюсов; если же порядки не кратны p, то они являются гармоническими *дробных* порядков, высших, когда дробь неправильная (смешанная), и низших, когда она правильная, т. е. меньше единицы.

Коэффициент распределения гармонической любого порядка может быть вычислен одним из способов, изложенных в § 3.4 и 3.5, если известен вид звезды векторов ЭДС для этой гармонической; однако по круговой схеме может быть построена только первоначальная звезда векторов, следовательно, ее нужно соответствующим образом перестроить, учитывая, что для всякого поля с числом пар полюсов p все углы между векторами ЭДС сторон секций представляются в p раз бо̀льшими, чем для двухполюсного поля.

Здесь уместно отметить, что понятие о коэффициенте распределения при дробных числах пазов на полюс и фазу имеет несколько иное содержание, чем при целых. Различие состоит в том, что при целых числах обмотки почти всех видов (кроме только однослойных равносекционных с нечетными числами пазов на полюс и фазу и шагом, отличным от диаметрального) имеют на всех полюсных делениях вполне одинаковое распределение сторон секций в пазах, между тем как при дробных числах это не соблюдается — на различных полюсных делениях оно различно, частью

по числу сторон секций, а частью — по их расположению по отношению к внешнему полю. По этой причине коэффициенты распределения при целых числах пазов на полюс и фазу можно было рассматривать как характеризующие именно распределение сторон секций на одном полюсном делении, чего при дробных сделать нельзя.

Практически это особенно отражается на коэффициентах распределения для гармонических четных порядков; при целых числах пазов на полюс и фазу они укладываются в один ряд с коэффициентами для гармонических нечетных порядков, но поскольку каждой стороне секции всегда можно подобрать диаметральную, а при диаметральном шаге коэффициенты укорочения шага для всех гармонических целых четных порядков равны нулю, эти порядки выпадают из рассмотрения. Между тем при дробных числах пазов никакой стороне секции нельзя подобрать диаметральную в общем смысле этого слова и в вычислении коэффициента распределения участвуют векторы ЭДС в сторонах секций всех полюсных делений — и нечетной, и четной нумерации, направления обхода которых взаимно противоположны. В определенных частных случаях эти векторы могут образовывать замкнутые многоугольники, и тогда соответствующие коэффициенты распределения принимают нулевые значения, но в общем случае для четных порядков они отличны от нуля.

Чтобы исключить возможность ошибок при перестраивании звезды векторов и свести до минимума число необходимых для него операций, нужно придерживаться определенных правил. Первым из них является отсчет всех углов в первоначальной звезде от ее оси симметрии, положение которой зависит от числа пазов на полюс и фазу.

Если числитель $bd + c$ дробного числа пазов имеет нечетное значение, то независимо от знаменателя ось симметрии первоначальной звезды совпадает с одним из ее векторов. Паз, которому соответствует этот вектор, целесообразно обозначить номером *0* (или Z); тогда угловые положения всех других векторов могут быть получены умножением зубцового деления $\alpha = 360°/Z$ на номер соответствующего паза.

Если числитель $bd + c$ имеет четное значение, а знаменатель d — нечетное, то ось симметрии пройдет посредине между некоторыми двумя векторами данной фазы; в этом случае нумерацию пазов следует начать с того, которому соответствует один из ближайших к оси векторов, а угловые положения будут определяться умножением α на номер паза, уменьшенный на $^1/_2$.

Если, наконец, и числитель $bd + c$, и знаменатель d четны, то, отбрасывая не представляющие интереса варианты распределения, при которых обмотка является не единичной, а производной, можно будет различить три случая: ось симметрии может либо совпадать с парой векторов, направленных на диаграмме

противоположно, либо проходить между двумя соседними векторами диаметрально противоположных пар одной и той же фазы, либо, наконец, проходить между пучками векторов двух других фаз, иными словами — посредине между двумя пучками векторов данной фазы, относящимися к соседним полюсным делениям. Очевидно, что для вычисления коэффициентов распределения во всех случаях, кроме последнего, нужно принимать косинусы углов, определяющих положения векторов, а в одном лишь последнем случае — их синусы.

Число векторов, угловые положения которых следует определять при вычислении коэффициентов распределения для гармонических всех порядков, по причине симметричности звезды векторов при четных значениях числителя $bd + c$ равно его половине, а при нечетных — на единицу больше целой части половины; но в последнем случае один вектор, а именно совпадающий по направлению с осью симметрии, всегда остается на одном и том же месте при всех преобразованиях звезды векторов, следовательно, косинус угла, определяющего его положение, равен положительной единице.

Все предшествующее изложение предполагает наличие готовой схемы обмотки, на которой следует определить положение оси симметрии и перенумеровать пазы, пользуясь вышеизложенными правилами. Однако составление схемы способом добавления или отнятия секций в обмотке с целым числом пазов, как это было описано в начале данной главы, было бы чрезмерно трудоемким. Чтобы облегчить эту операцию, может быть предложен простой прием, показанный на следующем примере.

Пусть требуется составить схему единичной обмотки с числом пазов на полюс и фазу $q = 1^2/_4$ и распределением секций в порядке 1 2 2 1; обмотка четырехполюсная с общим числом пазов $Z = 18$. Операция начинается с того, что выписывается ряд натуральных чисел от 1 до $6p$; они представляют номера участков, занятых одним слоем обмотки каждой фазы на каждом полюсном делении. Ось симметрии фазы, принимаемой за первую, должна в данном случае проходить посредине между двумя участками этой фазы, имеющими одинаковые числа сторон секций, например по две, а в промежутке между ними должно поместиться по одному участку двух других фаз; таким образом, здесь представлен третий из случаев, встречающихся при четных значениях и числителя $bd + c$, и знаменателя d.

Числа сторон секций первой фазы на различных участках вписываются в первую строку под номерами участков; между каждыми двумя из них оставляется по два интервала для других фаз. Чтобы разместить эти последние, следует учесть, что оси их симметрии сдвинуты влево и вправо от оси симметрии первой фазы на одну треть окружности; для каждой из фаз отводится отдельная строка. В результате получается таблица следующего вида:

Участок	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Фаза 1	—	1	—	—	2	—	—	2	—	—	1	—
» 2	2	—	—	2	—	—	1	—	—	1	—	—
» 3	—	—	1	—	—	1	—	—	2	—	—	2
Паз	10, 11	12	13	14, 15	16, 17	18	1	2, 3	4, 5	6	7	8, 9

Круговая схема обмотки, соответствующей этой таблице, представлена на рис. 5.9; для ее построения принят шаг $y = 4$, наиболее близкий к полюсному делению. Внутри схемы построена первоначальная звезда векторов ЭДС на сторонах секций первой фазы.

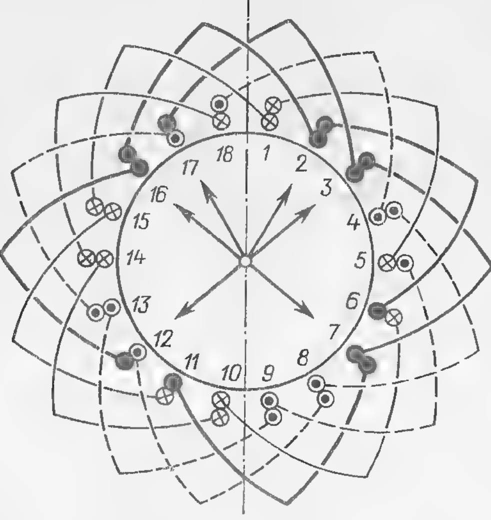


Рис. 5.9. Обмотка с $q = 1^2/_4$ и ее первоначальная звезда векторов ЭДС

Результаты составления таблицы — номера пазов для сторон секций одного слоя обмотки — могут быть затем внесены в таблицу обмотки, построенную согласно правилам, принятым на данном предприятии; даже при очень больших значениях знаменателя d или числа пар полюсов p составление таблицы этого вида достаточно просто, производится вполне автоматически и исключает ошибки.

5.4. КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИ ДРОБНЫХ ЧИСЛАХ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ

После того как стали известны номера пазов, занятых сторонами секций одного слоя, полностью отпадает необходимость

графического построения звезды векторов и ее преобразования к разным числам пар полюсов, соответствующим гармоническим различных порядков. Все дальнейшие операции по вычислению коэффициентов распределения могут быть произведены без помощи каких бы то ни было построений, только арифметически. Представляется целесообразным рассмотреть это на ряде примеров, охватывающих все случаи, перечисленные в предыдущем параграфе.

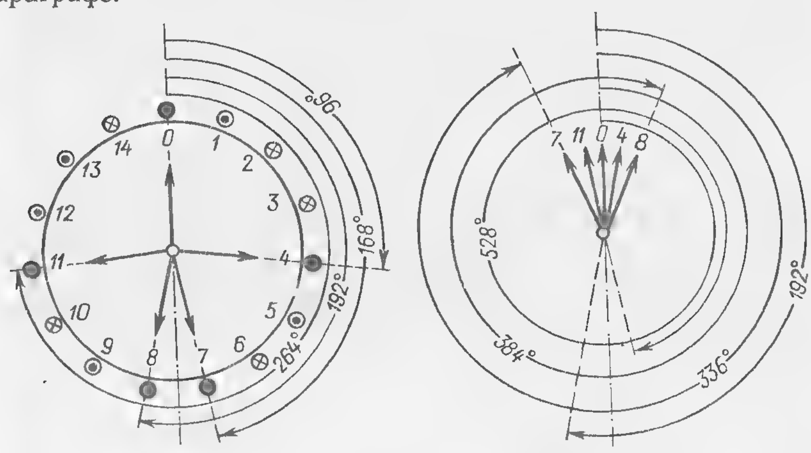


Рис. 5.10. Обмотка с $q = 1^1/_4$ и ее звезды векторов ЭДС для $\nu = 1/2$ и $\nu = 1$

Пример 5.4. Требуется вычислить коэффициенты распределения для обмотки с числом пазов на полюс и фазу $q = 1^1/_4$.

Единичная обмотка с таким числом пазов имеет число полюсов, равное знаменателю дроби, т. е. $2p = d = 4$, и только один вариант распределения сторон секций по полюсным делениям: 2 1 1 1. Полное число пазов $Z = 3 \cdot 4 \cdot 1^1/_4 = 15$, а зубцовое деление $\alpha = 360°/15 = 24°$. Схема распределения сторон секций всех трех фаз в одном слое представлена на рис. 5.10; номер *0* (или, что то же, $Z = 15$) приписан тому из трех одиночных пазов первой фазы, через который проведена ее ось симметрии. Кроме него, первой фазе принадлежат пазы *4*, *7*, *8* и *11*. Поскольку паз *11* расположен симметрично пазу *4*, а паз *7* — пазу *8*, угловые положения достаточно определять только для первых двух из них. При этом следует помнить, что пазы *4* и *11* лежат на полюсных делениях другой полярности, нежели пазы *0*, *7* и *8*, и потому находящиеся в них стороны секций обходятся в противоположном направлении по отношению к прочим; следовательно, соответствующие им ЭДС должны быть взяты с обратными знаками. Пазу *4* в первоначальной звезде векторов соответствует угол $4\alpha = 4 \cdot 24° = 96$, а пазу *7* — угол $7 \cdot 24° = 168°$; их косинусы равны соответственно $-0{,}1045$ и $-0{,}9782$, а сумма проекций всех векторов на ось симметрии пропорциональна величине

$$\sum \cos n\alpha = 1{,}0000 - 2\,(-0{,}1045) - 2 \cdot 0{,}9782 = -0{,}7474.$$

Частное от деления этой суммы на число векторов представляет коэффициент распределения данной обмотки по отношению к двухполюсному полю, т. е. гармонической порядка $\nu = 1/2$:

$$k_{q^1/_2} = \frac{-0{,}7474}{5} = -0{,}1495.$$

Для получения коэффициента распределения этой обмотки по отношению к основной волне четырехполюсного поля следует удвоить все углы; пазу *4* теперь будет соответствовать угол $2 \cdot 96° = 192°$ и пазу *7* — угол $2 \cdot 168° = 336°$, а их косинусы соответственно будут —0,9782 и 0,9136, откуда коэффициент распределения для основной волны

$$k_{q1} = \frac{1{,}0000 - 2\,(-0{,}9782) + 2 \cdot 0{,}9136}{5} = 0{,}9567.$$

Утроение углов даст коэффициент распределения для гармонической порядка $\nu = 3/2$; пазу *4* будет соответствовать угол 288°, а пазу *7* — угол 504°. Последний можно привести к первому обходу окружности, что даст $504° - 360° = 144°$; значения соответствующих косинусов 0,3090 и —0,8090, так что

$$k_{q^{3}/_{2}} = \frac{1{,}0000 - 2 \cdot 0{,}3090 + 2\,(-0{,}8090)}{5} = -0{,}2472.$$

Учетверение углов приведет к их значениям $4 \cdot 96° - 360° = 24°$ и $4 \cdot 168° - 360° = 312°$ со значениями косинусов 0,9136 и 0,6691, откуда коэффициент распределения для гармонической порядка $\nu = 2$ будет равен 0,1022. Продолжая этот процесс, можно получить значения коэффициентов распределения для гармонических: $k_{q^{5}/_{2}} = 0{,}2000$ для $\nu = 5/2$, $k_{q3} = 0{,}6472$ для $\nu = 3$ и $k_{q^{7}/_{2}} = -0{,}1095$ для $\nu = 7/2$. Дальше все вычисленные значения будут повторяться в обратном чередовании до порядка $\nu = 15/2$ со значением коэффициента распределения $k_{q^{15}/_{2}} = 0{,}2000$; этим заканчивается первый период изменения коэффициентов распределения.

Если сопоставить вычисленные значения с приложением 5, то обнаружится, что все они содержатся в столбце для обмотки с $q' = 5$; при этом для гармонических целых нечетных порядков они совпадают не только по абсолютным значениям, но и по знакам. Это свидетельствует об определенном сходстве свойств обеих обмоток — с дробным числом пазов на полюс и фазу $q = 1^1/_4 = {}^5/_4$ и с целым числом $q' = 5$, по крайней мере в отношении гармонических целых нечетных порядков, и потому такую обмотку обычно называют эквивалентной. Однако это сходство не распространяется на коэффициенты для гармонических целых четных порядков: так, для $\nu = 2$ обмотка с целым числом пазов $q' = 5$ имеет коэффициент распределения $k_{q2} = 0{,}8331$, между тем как обмотка с дробным числом $q = 1^1/_4$ для этого порядка имеет значение коэффициента 0,1022 — как для порядка $\nu = 13$ при $q' = 5$. Таким образом, эта эквивалентность несколько условна.

На рис. 5.11 сопоставлены диаграммы сложения векторов ЭДС основной волны и гармонической порядка $\nu = 2$ для двух обмоток — с $q' = 5$ и $q = 1^1/_4$; этот рисунок наглядно поясняет различие понятий о коэффициенте распределения для обмоток с целыми и дробными числами пазов на полюс и фазу.

Дробные порядки (в данном случае со знаменателем $d = 2$) имеют коэффициенты распределения из того же ряда, что и целые порядки, как представлено в следующей табличке:

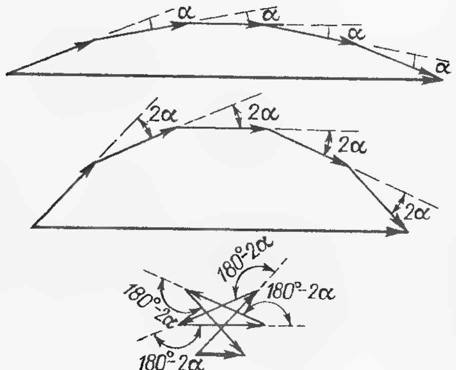


Рис. 5.11. Диаграммы сложения векторов ЭДС основной волны и гармонической порядка $\nu = 2$ обмоток с целым и дробным числами пазов на полюс и фазу

Коэффициент распределения	0,2000	—0,1495	0,9567	—0,2472	0,1022	0,2000	0,6472	—0,1095
Порядок гармонических	15/2 30/2==15	1/2 14/2=7 16/2=8 29/2 31/2	2/2=1 13/2 17/2 28/2==14 и т. д.	3/2 12/2=6 18/2=9 27/2	4/2=2 11/2 19/2 26/2==13	5/2 10/2=5 20/2==10 25/2	6/2=3 9/2 21/2 24/2==12	7/2 8/2=4 22/2==11 23/2

Пример 5.5. Требуется вычислить коэффициенты распределения для обмотки с числом пазов на полюс и фазу $q = 1^1/_5$.

Число полюсов такой обмотки не может быть равно нечетному знаменателю, и потому $2p = 2d = 10$; как и предыдущая, данная обмотка имеет только один вариант распределения секций по полюсным делениям: 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1, а полное число пазов равно $Z = 10 \cdot 1^1/_5 \cdot 3 = 36$, следовательно, зубцовое деление $\alpha = 360°/36 = 10°$. Схема распределения сторон секций фаз дана на рис. 5.12.

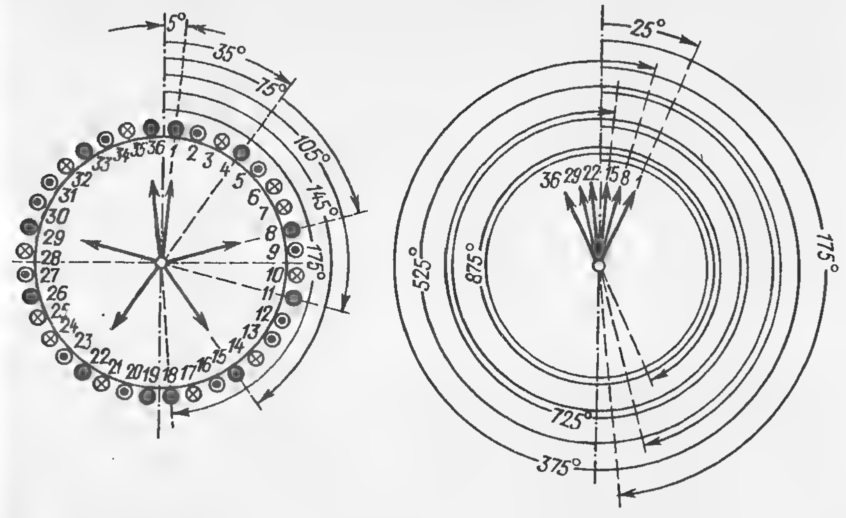


Рис. 5.12. Обмотка с $q = 1^1/_5$ и ее звезды векторов ЭДС для $\nu = 1$ и $\nu = 1/5$

Здесь ось симметрии проходит между двумя пазами, занятыми сторонами секций одной и той же фазы; но помимо того может быть проведена еще одна сопряженная ось, ей перпендикулярная. Выше было отмечено, что число осей симметрии равно произведению всех множителей, на которые произведено сокращение числителя c и знаменателя d дроби; по существу, следовало бы считать число пазов на полюс и фазу $q = 1^2/_{10}$. Данная обмотка является единичной, но она представляет двукратное повторение одного и того же распределения сторон секций по пяти полюсным делениям; вследствие этого можно заранее сказать, что двухполюсное поле не индуктирует в ней никакой ЭДС, так как в первоначальной

Таблица 5.2. **Вычисление коэффициентов распределения обмотки с $q = 1^1/_5$**

Порядок ν	Расчетные значения углов в градусах для пазов с номерами						Косинусы расчетных углов с учетом знаков при номерах пазов						Коэффициент распределения $k_{q\nu}$
	1	*4*	*8*	*11*	*15*	*18*	*1* (+)	*4* (−)	*8* (+)	*11* (−)	*15* (+)	*18* (−)	
1/5	5	35	75	105	145	175	0,9962	—0,8192	0,2588	0,2588	—0,8192	0,9962	0,1453
2/5	10	70	150	210	290	350	0,9848	—0,3420	—0,8660	0,8660	0,3420	—0,9848	0
3/5	15	105	225	315	75	165	0,9659	0,2588	—0,7071	—0,7071	0,2588	0,9659	0,1725
4/5	20	140	300	60	220	340	0,9397	0,7660	0,5000	—0,5000	—0,7660	—0,9397	0
5/5=1	25	175	15	165	5	155	0,9063	0,9962	0,9659	0,9659	0,9962	0,9063	0,9561
7/5	35	245	165	15	295	145	0,8192	0,4226	—0,9659	—0,9659	0,4226	0,8192	0,0920
9/5	45	315	315	225	225	135	0,7071	—0,7071	0,7071	0,7071	—0,7071	0,7071	0,2357
11/5	55	25	105	75	155	125	0,5736	—0,9063	—0,2588	—0,2588	—0,9063	0,5736	—0,1972
13/5	65	95	225	285	85	115	0,4226	0,0872	—0,2588	—0,2588	0,0872	0,4226	0,0837
15/5=3	75	165	45	135	15	105	0,2588	0,9659	0,7071	0,7071	0,9659	0,2588	0,6439
17/5	85	235	195	345	305	95	0,0872	0,5736	—0,9659	—0,9659	0,5736	0,0872	—0,1017

звезде всякому вектору всегда имеется диаметрально противоположный. То же самое будет в отношении поля с любым четным числом пар полюсов; следовательно, коэффициенты распределения для гармонических соответствующих им порядков $\nu = ^2/_5, ^4/_5, ^6/_5$ и т. д. должны быть равны нулю, что и подтверждается вычислением.

Наличие двух взаимно перпендикулярных осей симметрии распределения сторон секций по полюсным делениям позволяет ограничиться значениями косинусов угловых положений только тех пазов, которые лежат в первой четверти окружности, в данном случае трех: *1*, *4* и *8*. Симметрично им относительно второй оси симметрии расположены пазы соответственно *18*, *15* и *11*; косинусы углов, определяющих их положения, имеют те же абсолютные значения, но противоположные знаки. В табл. 5.2 даны расчетные значения углов, полученные умножением чисел натурального ряда на угловые положения пазов; эти последние представляют произведения зубцового деления α на номера пазов, уменьшенные на $^1/_2$. Во всех случаях, когда расчетные значения выходят из пределов первого обхода окружности, из них вычтены содержащиеся в них произведения целых чисел на 360°.

Далее в таблице вписаны значения косинусов расчетных углов, причем для пазов, лежащих на полюсных делениях четной нумерации, они взяты с обратными знаками; для напоминания об этом при номерах соответствующих пазов в головке таблицы поставлены знаки плюс или минус. Последний столбец таблицы содержит вычисленные значения коэффициентов распределения. Таблица заканчивается порядком $\nu = ^{17}/_5 = 3^2/_5$; дальше все значения повторяются в обратном чередовании. Равенство нулю коэффициентов при четном числителе дано только для двух первых его значений: 2 и 4; загромождать таблицу дальнейшими было бы излишним.

Сопоставление вычисленных значений с приложением 5 показывает, что они совпадают со значениями коэффициентов обмотки с числом пазов на полюс и фазу $q' = 6$, причем снова только для гармонических нечетных порядков. Однако на этот раз коэффициенты для гармонических целых нечетных порядков в половине общего их числа не совпадают по знакам. Так, несовпадение имеет место для порядков 5, 7 и 9; далее, для порядков 11, 13, 15 и 17 знаки совпадают, а для порядков 19, 21, 23 и 25 снова не совпадают и т. д.

Пример 5.6. Требуется вычислить коэффициенты распределения для обмотки с числом пазов на полюс и фазу $q = 1^2/_8$.

Согласно табл. 5.1 при этом числе пазов возможны четыре варианта распределения сторон секций по полюсным делениям; из восьми групп секций каждой фазы две группы имеют по две секции, а остальные — по одной:

1. 1 1 1 2 2 1 1 1
2. 1 1 1 2 1 2 1 1 (1)
3. 1 1 2 1 1 2 1 1
4. 1 1 2 1 1 1 2 1 (1)

Единичными являются только первые три из них, а последний представляет двукратное повторение обмотки с $q = 1^1/_4$, рассмотренной в примере 5.4. Первому из трех случаев с четными значениями числителя и знаменателя, рассмотренных в предыдущем параграфе, соответствует вариант 2, при котором ось симметрии данной фазы может быть проведена через паз, находящийся между двумя группами из двух пазов; схема распределения сторон секций одного слоя представлена на рис. 5.13. Из него видно, что помимо пазов с номерами *0* и *15*, лежащих на оси симметрии, к данной фазе относятся на одной половине окружности пазы *3*, *4*, *8* и *11*, а на другой — соответственно пазы *27*, *26*, *22* и *19*.

Цифры в скобках в конце ряда являются повторением его начала и ставятся тогда, когда ряду нужно придать симметричность относительно середины.

Процесс вычисления коэффициентов распределения дан в табл. 5.3, похожей на табл. 5.2, однако отличающейся от последней тем, что пазы *0* и *15* не имеют себе симметричных и потому косинусы соответствующих им углов входят в вычисление только по одному разу, между тем как для остальных пазов — попарно. Кроме того, новым в этой таблице является то, что вычисленные значения не содержатся в приложении 5; но если взять значения коэффициентов рас-

Таблица 5.3. **Вычисление коэффициентов распределения обмотки с $q = 1^2/_8$**

Порядок ν'	Расчетные значения углов в градусах для пазов с номерами: 0	3	4	8	11	15	Косинусы расчетных углов с учетом знаков при номерах пазов: 0 (+)	3 (−)	4 (−)	8 (+)	11 (−)	15 (+)	Коэффициент распределения $k_{q\nu}$
1/4	0	36	48	96	132	180	1,0000	−0,8090	−0,6691	−0,1045	0,6691	−1,0000	−0,1827
2/4=1/2	0	72	96	192	264	0	1,0000	−0,3090	0,1045	−0,9781	0,1045	1,0000	−0,0156
3/4	0	108	144	288	36	180	1,0000	0,3090	0,8090	0,3090	−0,8090	−1,0000	0,1236
4/4=1	0	144	192	24	168	0	1,0000	0,8090	0,9781	0,9135	0,9781	1,0000	0,9358
5/4	0	180	240	120	300	180	1,0000	1,0000	0,5000	−0,5000	−0,5000	−1,0000	0,1000
6/4=1½	0	216	288	216	72	0	1,0000	0,8090	−0,3090	−0,8090	−0,3090	1,0000	0,0764
7/4	0	252	336	312	204	180	1,0000	0,3090	−0,9135	0,6691	0,9135	−1,0000	0,1956
8/4=2	0	288	24	48	336	0	1,0000	−0,3090	−0,9135	0,6691	−0,9135	1,0000	−0,0934
9/4	0	324	72	144	108	180	1,0000	−0,8090	−0,3090	−0,8090	0,3090	−1,0000	−0,3236
10/4=2½	0	0	120	240	240	0	1,0000	−1,0000	0,5000	−0,5000	0,5000	1,0000	0,1000
11/4	0	36	168	336	12	180	1,0000	−0,8090	0,9781	0,9135	−0,9781	−1,0000	0,0209
12/4=3	0	72	216	72	144	0	1,0000	−0,3090	0,8090	0,3090	0,8090	1,0000	0,5236
13/4	0	108	264	168	276	180	1,0000	0,3090	0,1045	−0,9781	−0,1045	−1,0000	−0,1338
14/4=3½	0	144	312	264	48	0	1,0000	0,8090	−0,6691	−0,1045	−0,6691	1,0000	0,0733
15/4	0	180	0	0	180	180	1,0000	1,0000	−1,0000	1,0000	1,0000	−1,0000	0,4000
30/4=7½	0	0	0	0	0	0	1,0000	−1,0000	−1,0000	1,0000	−1,0000	1,0000	−0,2000

пределения для гармонических нечетных порядков из столбца с $q' = 5$ и умножить их на коэффициенты укорочения шага для гармонических этих же порядков для $\beta = 13/15$, то такие произведения совпадут со значениями, вычисленными для порядков с четными числителями, как это видно из следующей таблички:

ν'	1	3	5	7	9	11	13	15
$k_{q\nu'}$	0,9567	0,6472	0,2000	−0,1494	−0,2472	−0,1095	0,1022	0,2000
$k_{y\nu'}$	0,9781	0,8090	0,5000	0,1045	0,3090	−0,6691	−0,9135	−1,0000
$k_{w\nu'}$	0,9358	0,5236	0,1000	−0,0156	0,0764	0,0733	−0,0934	−0,2000

Таким образом, в данном случае эквивалентной является обмотка с целым числом пазов на полюс и фазу $q' = 5$, как и в примере 5.4, но с укорочением шага $\beta = {}^{13}/_{15}$, хотя в обмотке с $q = 1^1/_4$ рассматривался только один слой и ни о каком шаге не было речи. Если произвести вычисление коэффициентов распределения для прочих вариантов, то окажется, что варианту 1 эквивалентна обмотка с $\beta = {}^{14}/_{15}$, а варианту 3 — с $\beta = {}^{12}/_{15} = {}^4/_5$; тогда для варианта 4 нужно принять для общности $\beta = 1$, т. е. диаметральный шаг эквивалентной обмотки.

Как и в предыдущем примере, можно составить табличку чередования порядков гармонических, которым соответствуют полученные таким образом значения коэффициентов распределения, однако она будет охватывать только порядки с четными числителями:

Коэффициент распределения	−0,2000	−0,0156	0,9358	0,0764	−0,0934	0,1000	0,5236	0,0733
Порядок гармонических	30/4 60/4=15	2/4 28/4=7 32/4=8 58/4 62/4	4/4=1 26/4 34/4 56/4=14 и т. д.	6/4 24/4=6 36/4=9 54/4	8/4=2 22/4 38/4 52/4=13	10/4 20/4=5 40/4=10 50/4	12/4=3 18/4 42/4 48/4=12	14/4 16/4=4 44/4=11 46/4

Иначе обстоит дело с коэффициентами распределения для гармонических порядков с нечетными числителями, которые не могут быть получены из приложения 5; нет общего правила, которое позволило бы вычислять их иначе, чем это сделано в табл. 5.3, т. е. посредством суммирования тригонометрических функций углов, соответствующих пазам данной фазы при различных порядках гармонических. Когда это выполнено, для этих порядков можно составить такую же табличку чередования, как и предыдущая. Исследование процесса получения таких коэффициентов показывает, что в данном случае они представляют косинусы некоторых углов, кратных зубцовому делению α, деленные на 5 при числителях порядков, не кратных трем, и на 5/2 при кратных трем; эти углы выписаны в последней строчке таблички:

Коэффициент распределения	−0,1827	0,1236	0,1000	0,1956	−0,3236	0,0209	−0,1338	0,4000
Порядок гармонических	1/4 29/4 31/4 59/4 61/4	3/4 27/4 33/4 57/4 и т. д.	5/4 25/4 35/4 55/4	7/4 23/4 37/4 53/4	9/4 21/4 39/4 51/4	11/4 19/4 41/4 49/4	13/4 17/4 43/4 47/4	15/4 45/4
Угол	24°	72°	60°	12°	36°	84°	48°	0°

Аналогичные вычисления для варианта 1 показали бы более простой состав значений коэффициентов распределения для гармонических дробных порядков с нечетными числителями, а именно ±0,2000 для порядков с числителями, кратными трем, и ±0,1000 — для прочих порядков. Например, для варианта 3 состав

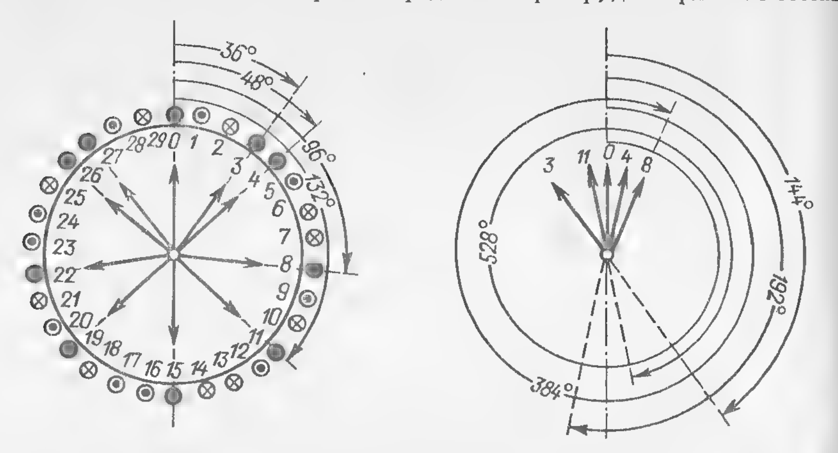


Рис. 5.13. Обмотка с $q = 1^2/_8$ и ее звезды векторов ЭДС для $\nu = 1$ и $\nu = 1/4$

коэффициентов более сложен: делить на 5 или соответственно на 5/2 здесь нужно не просто функции некоторых углов, кратных зубцовому делению или его половине, а их алгебраические суммы с ±0,5000. Наконец, для варианта 4 все коэффициенты для гармонических порядков с нечетными числителями равны нулю, как это и должно быть для производной обмотки.

Остальные случаи, встречающиеся при четных значениях и числителя $bd + c$, и знаменателя d, могли бы быть рассмотрены также при числах пазов со знаменателем $d = 8$, например $q = 1^4/_8$; однако тот случай, когда ось симметрии может быть проведена между двумя соседними пазами группы с четным числом сторон секций, мало отличается от рассмотренного в примере 5.5,

где ось симметрии расположена так же; что же касается случая, когда ось симметрии может быть проведена только между двумя группами пазов одной и той же фазы, принадлежащими разным полюсным делениям, то для его рассмотрения были бы пригодны варианты 1 и 3 обмотки с $q = 1^2/_8$, но еще проще рассмотреть с этой целью ту обмотку с $q = 1^2/_4$, для которой в § 5.3 были построены таблица распределения пазов и схема (см. рис. 5.9). Несмотря на свою простоту, эта обмотка содержит все необходимые элементы.

Пример 5.7. Требуется вычислить коэффициенты распределения для обмотки с числом пазов на полюс и фазу $q = 1^2/_4$ по схеме на рис. 5.9.

Единственным возможным положением оси симметрии является граница между участками *6* и *7* (см. табличку в конце § 5.3); другой ее конец при этом проходит между участками *12* и *1*. Таким образом, она располагается посредине между двумя группами данной фазы, содержащими по две стороны секций, и двумя группами прочих фаз, содержащими по одной стороне. Поэтому вместо косинусов углов, определяющих положение векторов ЭДС для гармонических различных порядков, здесь следует применять их синусы.

На одной половине окружности данной фазе принадлежат пазы *2*, *3* и *7*, а на другой — соответственно *17*, *16* и *12*, причем направления обхода в симметрично расположенных пазах одинаковы. По этой причине достаточно суммировать синусы только трех углов — для пазов *2*, *3* и *7*, что и выполнено в табл. 5.4. Подобно предыдущему примеру, вычисленные значения коэффициентов не содержатся в приложении 5, но для гармонических целых порядков могут быть получены умножением коэффициентов распределения из столбца для $q' = 3$ на коэффициенты укорочения шага, соответствующие $\beta = 8/9 = 0{,}8889$, а для гармонических дробных порядков принимают лишь два значения: ±0,3333 для порядков с числителями, кратными трем, и ±0,1667 для прочих. Чередование порядков гармонических представлено в следующей табличке:

Коэффициент распределения	0	0,1667	0,9452	0,3333	0,0607	0,1667	−0,5774	−0,1667	0,1399	−0,3333
Порядок гармонических	18/2==9	1/2 17/2 19/2	2/2=1 16/2=8 и т. д.	3/2 15/2	4/2=2 14/2=7	5/2 13/2	6/2=3 12/2=6	7/2 11/2	8/2=4 10/2=5	9/2

В дальнейшем коэффициенты распределения начиная с порядка $\nu = 19/2$, сохраняя те же абсолютные значения, изменяют знаки на обратные до порядка $\nu = 36/2 = 18$, которым заканчивается период их изменения; на протяжении последнего их знаки попеременно то совпадают, то не совпадают со знаками в приложении 5.

Пример 5.8. Требуется вычислить коэффициенты распределения для обмотки с числом пазов на полюс и фазу $q = 1^2/_5$.

Согласно табл. 5.1 при данном числе пазов на полюс и фазу возможны два варианта распределения сторон секций по полюсным делениям:

1. 2 1 1 1 2 2 1 1 1 2
2. 1 2 1 2 1 1 2 1 2 1

Таблица 5.4. **Вычисление коэффициентов распределения обмотки с $q = 1^2/_4$**

Поря-док ν	Расчетные значения углов в градусах для пазов с номерами						Синусы расчетных углов с учетом знаков при номерах пазов						Коэффициент распределения $k_{q\nu}$
	2	*3*	*7*	*12*	*16*	*17*	*2* (+)	*3* (+)	*7* (—)	*12* (+)	*16* (—)	*17* (—)	
1/2	30	50	130	230	310	330	0,5000	0,7660	—0,7660	—0,7660	0,7660	0,5000	0,1667
2/2=1	60	100	260	100	260	300	0,8660	0,9848	0,9848	0,9848	0,9848	0,8660	0,9452
3/2	90	150	30	330	210	270	1,0000	0,5000	—0,5000	—0,5000	0,5000	1,0000	0,3333
4/2=2	120	200	160	200	160	240	0,8660	—0,3420	—0,3420	—0,3420	—0,3420	0,8660	0,0607
5/2	150	250	290	70	110	210	0,5000	—0,9397	0,9397	0,9397	—0,9397	0,5000	0,1667
6/2=3	180	300	60	300	60	180	0	—0,8660	—0,8660	—0,8660	—0,8660	0	—0,5773
7/2	210	350	190	170	10	150	—0,5000	—0,1737	0,1737	0,1737	—0,1737	—0,5000	—0,1667
8/2=4	240	40	320	40	320	120	—0,8660	0,6428	0,6428	0,6428	0,6428	—0,8660	0,1399
9/2	270	90	90	270	270	90	—1,0000	1,0000	—1,0000	—1,0000	1,0000	—1,0000	—0,3333
18/2=9	180	180	180	180	180	180	0	0	0	0	0	0	0

Оба они имеют по две сопряженные оси симметрии, как и в примере 5.5, одна из которых проходит через два диаметрально противоположных паза; ее и будет целесообразно принять за основную. В данном случае методически безразлично, для какого варианта производить вычисление; если принять первый, то его схема представлена на рис. 5.14. Из нее видно, что первой фазе на одной половине окружности принадлежат пазы *4*, *8*, *9*, *12*, *13* и *17*, а на другой половине — симметрично с ними расположенные пазы соответственно *38*, *34*, *33*, *30*, *29* и *25*; ось симметрии проходит через пазы *0* и *21*. Поскольку число пар полюсов обмотки нечетно, симметрично расположенные пазы обходятся в одном и том же направлении; поэтому достаточно производить все операции с пазами на одной половине окружности, как и в примере 5.5.

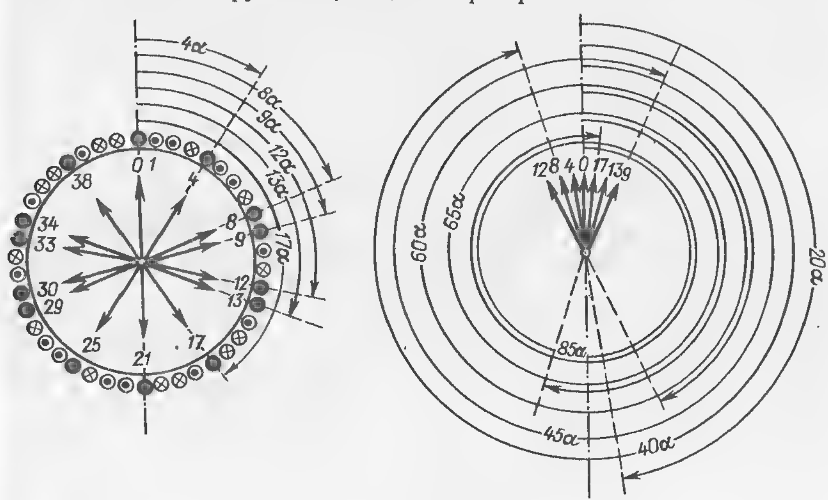


Рис. 5.14. Обмотка с $q = 1^2/_5$

Опыт рассмотрения предыдущих примеров позволяет значительно упростить исследование данного случая. Так, например, заранее можно сказать, что эквивалентная обмотка имеет число пазов на полюс и фазу $q' = 7$, следовательно, зубцовое деление выражается иррациональным числом, что затрудняет как вычисление угловых положений пазов, так и определение соответствующих им тригонометрических функций; однако все операции можно произвести не с углами, а с номерами пазов. Если для двухполюсного поля положения векторов ЭДС, например, первой половины окружности определяется номерами пазов

0 (+) *4* (—) *8* (+) *9* (+) *12* (—) *13* (—) *17* (+),

то для десятиполюсного поля их нужно увеличить в пять раз:

0 (+) *20* (—) *40* (+) *45* (+) *60* (—) *65* (—) *85* (+).

Полной окружности соответствует число пазов $Z = 42$, которое следует отнять от всех номеров, превосходящих Z:

0 (+) *20* (—) *40* (+) *3* (+) *18* (—) *23* (—) *1* (+).

Остается учесть поворот на 180° векторов на полюсных делениях одной полярности, например отмеченной знаком минус.

Таким образом, десятиполюсное поле индуктирует в данной обмотке ЭДС, векторы которых образуют пучок с равномерным распределением, как и в однослойной обмотке с $q' = 7$; отсюда согласно приложению 5 коэффициент распределения для основной волны $k_{q1} = 0{,}9558$. По этому же приложению могут быть найдены коэффициенты распределения и для всех гармонических целых нечетных

порядков. Согласно приложению 5 полупериод изменения коэффициентов распределения содержит 11 различных значений для нечетных порядков, которые и могут быть выписаны в виде таблички, хотя бы и без знаков:

Коэффициент распределения	0,0747	0,2291	0,9558	0,1429	0,1585	0,0722	0,0974	0,6420	0,1955	0,0865	0,1429
Порядок гармонических	1/5 41/5 43/5 83/5 85/5=17 и т. д.	3/5 39/5 45/5=9 81/5 87/5	5/5=1 37/5 47/5 79/5 89/5	7/5 35/5=7 49/5 77/5 91/5	9/5 33/5 51/5 75/5=15 93/5	11/5 31/5 53/5 73/5 95/5=19	13/5 29/5 55/5=11 71/5 97/5	15/5=3 27/5 57/5 69/5 99/5	17/5 25/5=5 59/5 67/5 101/5	19/5 23/5 61/5 65/5=13 103/5 107/5	21/5 63,5 105/5=21

Вследствие нечетности знаменателя гармонические порядков с четными значениями числителя имеют коэффициенты распределения, равные нулю. Таким образом, табличка коэффициентов распределения в данном случае составлена без вычислений.

Однако так может быть только при наличии готовых таблиц коэффициентов распределения обмоток с целыми числами пазов на полюс и фазу, ограниченными некоторым пределом, который для этих обмоток может быть достаточно высок (как, например, в приложении 5 — до $q = 12$), но для числителей дробных чисел пазов на полюс и фазу он слишком мал. Даже для чисел пазов на полюс и фазу в пределах таблицы приложения 15, ограниченной значением знаменателя дроби $d = 10$, и при минимальной целой части $b = 1$ уже нужно было бы иметь таблицы коэффициентов распределения, доведенные до $q = 19$; но это далеко не предел. Поэтому следует указать способ, облегчающий вычисления, если даже не прибегать к помощи ЭВМ.

Для этого достаточно применить калькулятор, имеющий тригонометрические функции, что дает возможность не вычислять углы наклона векторов ЭДС отдельных пазов, которые могут быть иррациональными, а сразу находить значения косинусов или синусов для произведений угла α на номера пазов. Число различных значений таких косинусов или синусов не может быть больше числителя неправильной дроби $bd + c$; хотя оно иногда довольно велико, но доступно для вычисления.

Если известно распределение секций каждой фазы по полюсным делениям, которое может быть задано номерами пазов, занятых одним слоем одной фазы единичной обмотки, то для этих пазов сразу могут быть выписаны значения тригонометрических функций, соответствующих углам, равным произведениям номеров пазов n на элементарный угол α:

$$n\alpha = \frac{n\pi}{3q} = \frac{n\pi}{3\,(bd + c)}.$$

Вычислять сами эти углы нет надобности — вычислительное устройство выдаст их косинусы или синусы с соответствующими знаками, которые нужно будет потом исправить с учетом того, что направления обхода на соседних полюсных делениях противоположны. Коэффициент распределения для ЭДС, индуктированной двухполюсным полем, является алгебраической суммой всех полученных таким образом результатов, разделенной на число слагаемых. При нечетных значениях знаменателя d эта сумма должна быть равна нулю, что может служить косвенной проверкой правильности вычисления.

Чтобы вычислить коэффициент распределения для основной волны, т. е. ЭДС, индуктированной полем с p парами полюсов, следует увеличить все углы в p раз и снова получить для них тригонометрические функции, не вычисляя сами эти углы, исправить их знаки сообразно полюсным делениям, просуммировать и разделить на число слагаемых. Можно было бы начать с составления таблицы косинусов или синусов для всех значений $n\alpha$ при n от 1 до 3 $(bd + c)$, но в этом не всегда имеется необходимость, так как многие значения при умножении повторяются.

Пример 5.9. Требуется вычислить коэффициент распределения для основной волны обмотки с $2p = 14$, $q = 1^4/_7$, с распределением секций по пазам согласно ряду 2 1 2 1 2 1 2. Ось симметрии этого ряда проходит через паз, находящийся в середине ряда; поэтому достаточно только определить косинусы всех углов $n\alpha$ до значения n, соответствующего половине окружности:

$$n = 6\,(bd + c)/2 = 6\,(7 + 4)/2 = 33.$$

Обмотка занимает на этом участке пазы с номерами: *+0 —4 —5 +10 —13 —14 +19 +20 —23 +28 +29 —33*; выписывать номера пазов на второй половине окружности не требуется, потому что они расположены симметрично с этими. Более того, косинусы углов, соответствующих пазам, расположенным симметрично по отношению к середине этого ряда, одинаковы по значению, но противоположны по знаку, что и соответствует полярности двухполюсного поля. Знаки плюс и минус при номерах соответствуют направлениям обхода сторон секций в пазах. Легко видеть, что сумма всех этих косинусов равна нулю, что и должно быть, поскольку двухполюсное поле не может индуктировать в данной обмотке никакой ЭДС.

Теперь следует найти косинусы углов для четырнадцатиполюсного поля, аргументы которых в 7 раз больше; нет надобности вычислять эти углы, но до-

статочно умножить на 7 номера всех пазов и отнять от этих преобразованных номеров содержащиеся в них произведения полного числа пазов $Z = 66$ на числа натурального ряда; это даст ряд

$$+0\ -28\ -35\ +70\ -91\ -98\ +133\ +140\ -161\ +196\ +203\ -231$$

или же, после преобразования,

$$+0\ +5\ +2\ +4\ +8\ +1\ +1\ +8\ +4\ +2\ +5\ +0.$$

Таким образом, пучок векторов ЭДС пазов имеет вид

	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1
пазы:	−8			−5	−4		−2	−1	0	+1	+2		+4	+5			+8

Для такого пучка в таблицах нельзя найти готовое значение коэффициента распределения, и потому его нужно вычислить, для чего требуется 5 значений косинусов — для α, 2α, 4α, 5α и 8α; их сумму нужно удвоить и прибавить к ней $\cos 0° = 1{,}0$; после этого остается разделить итог на число компонентов $d + c = 11$:

$$1 + 2\,(0{,}9955 + 0{,}9819 + 0{,}9284 + 0{,}8888 + 0{,}7237)/11 = $$
$$= 10{,}0366/11 = 0{,}9124.$$

Таким же способом можно получить коэффициенты распределения для гармонических любых порядков; следует только не забывать, что для целых порядков, например $\nu = 5$, нужно умножать все углы на произведения $11 \cdot 5 = 55$ и т. д.

5.5. ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ОБМОТКИ

Примеры, рассмотренные в предыдущем параграфе, позволяют сделать ряд обобщающих выводов о системах коэффициентов распределения обмоток трехфазного тока с дробными числами пазов на полюс и фазу.

Если числитель $bd + c$ дробного числа, представленного в виде неправильной дроби, или его знаменатель d, или оба они нечетны и не имеют общих множителей, то все коэффициенты распределения обмотки с таким числом пазов на полюс и фазу по крайней мере по абсолютным значениям равны коэффициентам распределения эквивалентной обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу

$$q' = bd + c \qquad (5.6)$$

для гармонических нечетных порядков; таким образом, если эти коэффициенты известны, то вычисления производить не требуется, нужно лишь установить, к каким порядкам гармонических данной обмотки, нечетным, четным или дробным, относятся их значения. Средством для этого во всех рассмотренных случаях является составление табличек чередования порядков, исходным соображением для которого служит равенство абсолютных значений коэффициентов распределения для гармонических всех целых нечетных порядков обеих обмоток.

То обстоятельство, что знаки при коэффициентах распределения обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу и ее эквивалентной обмотки не всегда совпадают, большей частью не является существенным для работы обмотки; смысл его разъясняется в следующем параграфе. Гораздо важнее то, что эквивалентная обмотка сама может иметь более или менее сложный вид,

который необходимо определить, для чего достаточно построить пучок векторов ЭДС одной фазы данной обмотки для основной волны; он и представляет изображение распределения сторон секций эквивалентной обмотки.

Число различных значений коэффициентов распределения эквивалентной обмотки, которое должно быть учтено при составлении таблички чередования порядков, равно числу абсолютных значений ее коэффициентов распределения для гармонических нечетных порядков в полупериоде их изменения. Границей первого полупериода служит коэффициент для гармонической порядка $\nu = 3q'$; если q' четно, то этот порядок четный и не входит в число учитываемых, поэтому число последних равно $^3/_2 q'$, как в примере 5.5; если же q' нечетно, то и этот порядок нечетен, следовательно, он попадает в табличку чередования порядков либо в конце ряда, как в примере 5.8, либо в его начале, как в примере 5.4, а число коэффициентов равно $^3/_2 q' + {}^1/_2$.

Если числитель $bd + c$ и знаменатель d оба четны, но иных общих множителей, кроме 2, у них нет, как в примерах 5.6 и 5.7, то число пазов на полюс и фазу эквивалентной обмотки

$$q' = \frac{bd + c}{2}. \qquad (5.7)$$

В этом случае число различных абсолютных значений коэффициентов распределения равно $^3/_2\,(bd + c) + 1$; они только через одно принадлежат к коэффициентам эквивалентной обмотки, а остальные должны быть вычислены особо, причем не представляется возможным дать для этого какие-либо общие правила. Если q' нечетно, как в примерах 5.6 и 5.7, то значение коэффициента распределения, соответствующее границе полупериода, попадает в табличку чередования порядков в начале последнего ряда, подобно примеру 5.4; но помимо того в конце ряда должно быть приписано еще одно значение, не содержащееся среди коэффициентов эквивалентной обмотки. Если же q' четно, то с обоих концов ряда значений следует приписать еще по одному, вычисляемому особо. Примером этого может служить обмотка с $q = 1^2/_{10}$, $q' = 6$.

Числитель $bd + c$ и знаменатель d могут иметь и иные общие множители, например первоначальные числа 5, 7, ... или их произведения либо друг на друга, либо на 2 и его степени, хотя вероятность этого быстро убывает с увеличением знаменателя d. Во всех таких случаях число пазов на полюс и фазу эквивалентной обмотки

$$q' = \frac{bd + c}{t}, \qquad (5.8)$$

где t — общий наибольший делитель числителя $bd + c$ и знаменателя d, а между каждыми двумя значениями коэффициентов распределения эквивалентной обмотки, учитываемыми при составлении таблички чередования порядков, следует поместить

t — 1 значений, ей не принадлежащих, которые должны быть вычислены особо. В целом структура таких табличек может быть представлена следующей:

Числитель дробного числа $bd+c$		Нечетный		Четный	
Знаменатель дробного числа d		Нечетный	Четный	Нечетный	Четный
Значение, служащее границей полупериода или периода	Слева Справа	Нет Есть	Есть Нет	Нет Нет	Есть Есть
Число значений коэффициентов		$\frac{3}{2}(bd+c)+\frac{1}{2}$	$\frac{3}{2}(bd+c)+\frac{1}{2}$	$\frac{3}{2}(bd+c)$	$\frac{3}{2}(bd+c)+1$
Пример		5.8	5.4	5.5	5.6; 5.7

Во всех тех случаях, когда числитель c дробного числа пазов q равен единице или разности d — 1, возможен только один вариант распределения сторон секций по полюсным делениям и эквивалентной обмоткой для него является однослойная обмотка с числом пазов на полюс и фазу q', как в примерах 5.4 и 5.5; но при всяком ином значении числителя c согласно табл. 5.1 становятся возможными уже несколько вариантов. Число пазов на полюс и фазу q' эквивалентных обмоток для всех них одинаково, но только для одного из них эквивалентной является однослойная обмотка; для всех других она имеет более сложный вид.

В приложении 15 сведены все возможные варианты обмоток с дробными числами пазов на полюс и фазу, имеющими целую часть $b = 1$, знаменатели d от 2 до 10 и числители c от 1 до d — 1; эти пределы достаточны для того, чтобы проследить основные закономерности выполнения обмоток, хотя и не могут исчерпывать потребности практики. В этом приложении представлены сами варианты распределения сторон секций одной фазы в виде цифровых рядов, ориентированных относительно общей оси симметрии, причем они переходят от наиболее сосредоточенных к менее сосредоточенным. Далее изображены пучки векторов основной волны ЭДС в виде рядов цифр, указывающих числа векторов на отдельных направлениях; нуль означает, что ни одного вектора на данном направлении нет. В тех случаях, когда возможно разложение эквивалентной обмотки на две более простые составные части, это отмечено подчеркиванием и надчеркиванием цифр ряда; если при этом надчеркнута и подчеркнута цифра 2, это означает, что один вектор на данном направлении относится к одной части, а второй — к другой. Более сложные случаи разложения разъяснены в примечаниях к таблице при-

ложения. Все пучки векторов ЭДС также ориентированы относительно общей оси симметрии. В таблице указаны полные числа пазов эквивалентной обмотки, и если последняя состоит из двух частей, сдвинутых друг относительно друга, то — и соответствующие укорочения шага. В двух следующих столбцах помещены коэффициенты распределения для основной волны и для ЭДС, индуктированной двухполюсным полем.

Из этого приложения прежде всего видно, что если числитель неправильной дроби $bd + c$ и знаменатель d не имеют общих множителей, в том числе и 2, то в пучках векторов ЭДС на каждом направлении лежит только по одному вектору. При этом, если возможно несколько вариантов распределения сторон секций, то только для одного из них векторы располагаются подряд, без перерывов, т. е. эквивалентной обмоткой для этого варианта является однослойная; но все варианты являются единичными.

При четных числителях $bd + c$ во многих, хотя и далеко не во всех случаях представляется возможным разложить эквивалентную обмотку на две одинаковые части с числом пазов на полюс и фазу $q'/2$, сдвинутые друг относительно друга на тот или иной угол, как в однослойной равносекционной обмотке с укорочением шага. При нечетных числителях этого сделать нельзя, зато один вариант распределения непременно дает эквивалентную обмотку, у которой крайние векторы пучка отставлены на одно деление, как у обмоток, коэффициенты распределения которых даны в приложении 7, а при больших значениях числителя — дважды на одно деление, как у обмоток по приложению 8.

Если числитель $bd + c$ и знаменатель d имеют общие множители, в том числе 2 и его степени, то поскольку число пазов на полюс и фазу эквивалентной обмотки меньше числителя в t раз, на некоторых направлениях, а иногда и на всех число векторов может доходить до t, как это можно видеть на примере чисел пазов $q = 1^4/_8$ и $1^5/_{10}$. При этом эквивалентная обмотка имеет более или менее сложный вид, не всегда допускающий разложение на достаточно простые элементы. В этом случае по крайней мере один из вариантов представляет производную обмотку, признаком которой является нулевое значение коэффициента распределения для ЭДС, индуктируемой двухполюсным полем.

В отношении индуктирования основной волны ЭДС самыми выгодными являются варианты с наиболее высокими значениями коэффициента распределения, т. е. те, для которых эквивалентными служат простые однослойные обмотки. Пока числитель c не очень сильно отличается от единицы или d — 1, такими являются варианты с наиболее сосредоточенным распределением сторон секций, но по мере приближения c к $d/2$ эти варианты перестают давать наибольшие значения коэффициентов распределения, уступая тем, при которых пазы, занятые данной фазой, в целом ближе всего расположены к точкам деления окружности на $2p$ равных частей. Как правило, наиболее высокому значению

коэффициента распределения для основной волны сопутствует низкое значение его для ЭДС, индуктированной двухполюсным полем, в том числе, хотя и не всегда, нулевое; однако вполне строгой закономерности в этом нет — при наличии общих множителей у числителя $bd + c$ и знаменателя d наименьшее значение коэффициента распределения для ЭДС двухполюсного поля обычно сопутствует далеко не самому высокому значению его для основной волны. Так, например, при $q = 1^6/_8$ самое малое значение коэффициента для ЭДС двухполюсного поля, а именно 0,0171, сопутствует довольно низкому значению $k_{q1} = 0{,}9231$, в то время как наибольшему $k_{q1} = 0{,}9556$ — значение 0,0660.

При возрастании числителя $bd + c$, безразлично за счет чего — знаменателя d или целой части b дробного числа, или, наконец, их обоих вместе, число пазов на полюс и фазу эквивалентной обмотки q' быстро выходит из пределов, приведенных в приложении 5, и воспользоваться готовыми значениями коэффициентов распределения становится невозможно; однако для гармонических нечетных порядков их всегда можно вычислить, если известен вид эквивалентной обмотки. С другой стороны, значения коэффициентов для основной волны и ближайших к ней гармонических нечетных порядков быстро приближаются к соответствующим значениям для гладкой обмотки, т. е. имеющей $q' = \infty$, особенно когда эквивалентной является однослойная обмотка. Действительно, в пределах точности до четвертого знака включительно, принятой для всех помещенных в этой книге численных значений, для гладкой обмотки $k_{q1} = 0{,}9549$; наибольшее значение q' в приложении 15 у обмотки с $q = 1^9/_{10}$, для которой $k_{q1} = 0{,}9550$.

Для иллюстрации в приложении 16 даны абсолютные значения коэффициентов распределения для гармонических всех порядков для обмоток с числами пазов вида $b + 1/2$ при b от 1 до 7, а также для гладкой обмотки. Из него видно, что с увеличением b все коэффициенты приближаются к предельным, и тем быстрее, чем выше порядки гармонических, причем особенно это относится к гармоническим четных порядков, коэффициенты которых стремятся к нулю — пределу коэффициентов распределения для всех гармонических четных порядков, понимаемому в том смысле, как это было указано в § 5.3. Обмотки с этими числами пазов не имеют коэффициентов для гармонических дробных порядков, но это не играет роли, так как последние подчиняются тем же правилам чередования, как и целые порядки.

Таблицу, подобную приложению 15, можно составить с любыми значениями целой части b дробного числа пазов, например 2, 3 и т. д. На распределении сторон секций это отразилось бы в том, что вместо чисел сторон секций 1 и 2 нужно было бы ставить соответственно 2 и 3, 3 и 4 и т. п., что не изменило бы объем этой части таблицы; но очень сильно стали бы возрастать изображения пучков векторов ЭДС. Общие свойства обмоток зависят от целой

части b в том отношении, что с ее увеличением постоянно сглаживается различие между обмотками с дробными и с ближайшими к ним целыми числами пазов на полюс и фазу. Кроме того, следует не упускать из вида, что при нечетном знаменателе d четность или нечетность числителя $bd + c$ зависит от целой части b; но при четном знаменателе d четность или нечетность числителя $bd + c$ не зависит от b и определяется только числителем c.

5.6. МДС ОБМОТОК С ДРОБНЫМИ ЧИСЛАМИ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ

Исследование электромагнитных свойств обмоток с целыми числами пазов на полюс и фазу и шагом как диаметральным, так и отличным от него, было возможно начать с исследования свойств единичных витков или секций, имеющих этот шаг, и затем переходить к обмотке, составленной из таких элементов, поскольку не представляло особых затруднений сформулировать закон образования из них целой обмотки с любым числом фаз. Эта задача облегчалась тем, что период разложения графика МДС всей обмотки был тем же, что и для отдельных элементов.

Но при дробных числах пазов на полюс и фазу, даже при условии, что обмотка состоит из одинаковых элементов, задача осложняется не только тем, что период разложения результирующего графика МДС отличен от удвоенного полюсного деления, но еще и тем, что закон сложения обмотки из отдельных элементов большей частью не поддается формальному изображению. Так, во всех случаях, когда $1 < c < d - 1$, устройство обмотки допускает большее или меньшее число вариантов распределения сторон секций по полюсным делениям; было бы крайне затруднительно дать удобные для практического применения правила учета такой неоднозначности. Поэтому остается проводить исследование по частям, используя, где это возможно, результаты исследований для целых чисел пазов на полюс и фазу.

Период разложения графика МДС всякой единичной обмотки представляет полную окружность машины; для всех целых чисел пазов на полюс и фазу в нем содержатся только два полюсных деления, а для всех дробных — $2d$ полюсных делений, если d нечетно, и d, если оно четно.

Если ограничить рассмотрение только обмотками трехфазного тока, то первым результатом исследований для целых чисел пазов является отсутствие на графике МДС гармонических с порядками, кратными трем, несмотря на то, что коэффициенты распределения для них могут иметь относительно высокие значения. Это распространяется на поле с любым числом полюсов — как с d или $2d$, так и на двухполюсное; следовательно, должны отсутствовать гармонические не только целых порядков, кратных трем, но и дробных порядков, у которых числитель в неправильной дроби кратен трем.

Рис. 5.15. МДС обмотки с $q = 1^1/_4$

Выше было указано, что при четных значениях числителя c и знаменателя d сам коэффициент распределения для многих вариантов обмотки содержит в себе множитель, эквивалентный коэффициенту некоторого укорочения шага; следовательно, независимо от фактического шага секций такие обмотки должны отфильтровывать гармонические, соответствующие действию такого укорочения. Сочетание этого свойства с фактическим укорочением или удлинением шага секций может дать очень высокую степень исключения высших гармонических из графика МДС, конечно, кроме гармонических зубцовых порядков. При нечетных значениях либо числителя c, либо знаменателя d, либо и того, и другого имеет место аналогичное явление с той лишь разницей, что если числитель неправильной дроби $bd + c$ нечетен, то по приложениям 1 и 5 нельзя подобрать такие значения коэффициентов укорочения шага и распределения, произведение которых было бы равно коэффициенту распределения данного варианта обмотки.

Наконец, при нечетном значении знаменателя d в графике МДС не могут содержаться гармонические четных порядков, целых или дробных, потому что коэффициенты распределения для них равны нулю. Ниже будет дано графическое подтверждение этого обстоятельства.

Для дальнейшего исследования необходимо обратиться к непосредственному построению графиков МДС обмоток с дробными числами пазов на полюс и фазу. На рис. 5.15 приведены схема единичной обмотки с числом пазов $q = 1^1/_4$ и шагом $y = 3$, графики МДС отдельных фаз в момент времени, когда ток в одной из них достигает наибольшего значения, и график результирующей МДС.

Рассмотрение последнего показывает, что он состоит из четырех площадок различной формы. Это свидетельствует о наличии в его разложении гармонических как целых, так и дробных порядков с теми изъятиями, которые были установлены выше. В частности, при принятом шаге $y = 3$ укорочение шага составляет $\beta = 3/(3 \cdot 1^1/_4) = 4/5 = 0{,}8$; поэтому помимо гармонических порядков, кратных трем, в графике не могут содержаться гармонические порядков, кратных 5. По отношению к двухполюсному полю шаг $y = 3$ представляет укорочение $\beta' = 3/(3 \cdot 2 \cdot 1^1/_4) = 2/5 = 0{,}4$, и потому эта кратность касается не только целых,

но и дробных порядков. В итоге в разложении графика должны остаться только гармонические следующих порядков: 1/2; 1; 2; 7/2; 4; 11/2; 13/2; 7; ...

Результирующий график содержит две симметричные и две несимметричные площадки; оси симметрии первых находятся друг от друга на расстоянии двойного полюсного деления, а оси, проведенные на расстоянии одного полюсного деления от них, делят несимметричные площадки на части различной формы и неодинаковые по площади. Если теперь перевернуть отрицательные площадки, снести все четыре площадки на общую ось

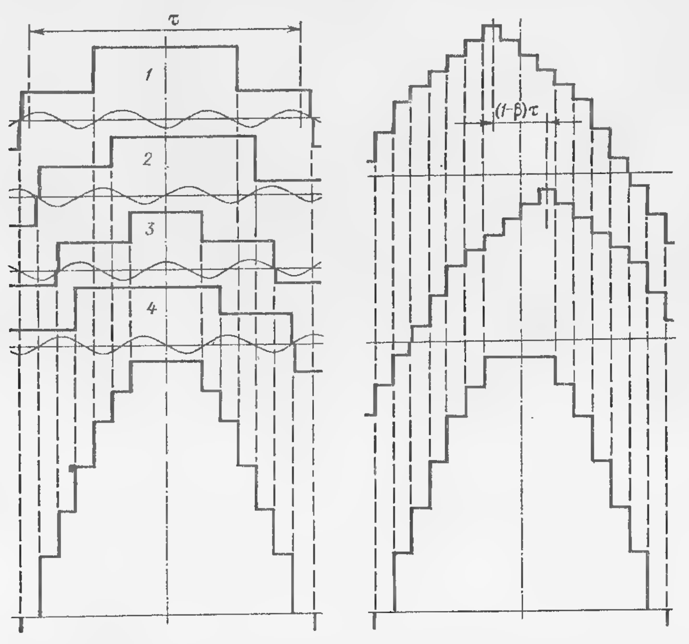


Рис. 5.16. Сопоставление графиков МДС обмоток с $q = 1^1/_4$ и $q' = 5$

и просуммировать их ординаты, то получится многоступенчатый график, представленный в левой части рис. 5.16. В правой части этого рисунка дан график МДС обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу $q' = bd + c = 5$ и шагом $y = 12$, т. е. с тем же укорочением $\beta = 4/5$. Он составлен суммированием двух графиков для обмоток с диаметральным шагом, сдвинутых друг относительно друга соответственно данному укорочению. Оба результирующих графика в точности одинаковы, из чего следует, что в электромагнитных свойствах обеих обмоток должно быть много общего подобно тому, как это было уже установлено для электрических свойств.

Качественный и количественный состав обоих графиков на рис. 5.16 совершенно ясен: в них содержатся гармонические

только целых нечетных порядков, не кратных трем, кроме гармонических порядков, кратных пяти. Амплитуды всех гармонических пропорциональны соответствующим обмоточным коэффициентам и обратно пропорциональны порядкам; среди них выделяются гармонические зубцовых порядков

$$\nu_z = 6q'i \mp 1;$$

в данном случае наиболее отчетливо выраженную первую серию этих гармонических составляет пара с порядками $\nu_z = 6 \cdot 5 \mp 1 = 29$ и 31.

Напротив, состав результирующего графика на рис. 5.15 ясен далеко не во всех отношениях. В нем отчетливо представлена гармоническая, имеющая в двухполюсном поле порядок 2, а в четырехполюсном служащая основной волной с периодом 2τ; но первая гармоническая разложения, являющаяся для обмотки гармонической дробного порядка $\nu = 1/2$, представлена относительно слабо. Поскольку график нельзя разделить на такие две части, которые после относительного смещения вдоль оси абсцисс на половину периода разложения были бы симметричны относительно этой оси, несомненно наличие некоторого комплекта гармонических четных порядков. Очевидно, что в разложении не содержатся гармонические порядков, кратных трем, а также тех порядков, которые должны исключаться укорочением шага. Наконец, график имеет 15 ступеней, соответствующих зубчатости якоря; правда, при данном распределении токов в фазах некоторые из них сливаются, благодаря чему три площадки из четырех имеют верхнюю ступень шириной в два зубцовых деления, но достаточно малейшего поворота звезды векторов тока, чтобы они разделились. Основу этих ступеней составляет биение двух гармонических зубцовых порядков первой серии $\nu_z = 6q'i \mp 1 = 6^1/_2$ и $8^1/_2$; вторую серию представляют целые четные порядки 14 и 16, третью — снова дробные $21^1/_2$ и $23^1/_2$, а четвертую — целые, но уже нечетные: 29 и 31. Они-то и являются зубцовыми первой серии для $q' = 5$.

При суммировании составляющих графиков на рис. 5.16 гармонические всех четных и дробных порядков уничтожаются, а гармонические нечетных целых порядков складываются так же, как и основные волны, потому что их обмоточные коэффициенты у обеих обмоток соответственно одинаковы. Для иллюстрации на рис. 5.16 показана без соблюдения масштаба ординат одна из гармонических дробных порядков — с $\nu = 6^1/_2$; ясно видно, что на площадках нечетной нумерации она имеет фазу, противоположную фазе на площадках четной нумерации.

Из самых общих соображений следует, что разложение графика МДС должно удовлетворять уравнению (4.15), следовательно, давать возможность определения обмоточных коэффициентов, входящих в состав коэффициентов разложения a_ν. При данном числе пазов на полюс и фазу разложение результирующего графика еще не является слишком громоздкой задачей; однако при этом будут утеряны коэффициенты для гармонических порядков, кратных трем, которые при определенных условиях представляют интерес. Поэтому целесообразнее разлагать график только одной какой-либо фазы.

При этом следует прежде всего учесть, что уравнение (4.15) составлено для разложения функции, периодом которой является двойное полюсное деление 2τ; здесь же период больше в некоторое целое число раз, в данном случае вдвое, т. е. 4τ. Следовательно, выражение (4.1) для общего вида коэффициента разложения должно быть соответствующим образом исправлено, а порядки ν' относятся к двухполюсному полю. С учетом этого выражение (4.1) следует переписать так:

$$a_{\nu'} = \frac{1}{2\tau}\int_0^{4\tau} f(x)\cos\frac{\nu'\pi x}{2\tau}\,dx. \qquad (5.9)$$

Однако график МДС одной фазы симметричен относительно не только той оси, которая на рис. 5.15 принята за ось ординат, но и еще одной оси, отстоящей от первой на расстоянии 2τ; поэтому интегрирование нет надобности распространять на весь период разложения 4π, поскольку его результаты на обеих половинах этого интервала будут одинаковыми; таким образом,

$$a_{\nu'} = \frac{1}{\tau}\int_0^{2\tau} f(x)\cos\frac{\nu'\pi x}{2\tau}\,dx. \qquad (5.10)$$

Здесь

I. $f(x) = +2Isq\sqrt{2}$ в пределах от $x = 0$ до $x = {}^4/_{15}\tau$;
II. $f(x) = +Isq\sqrt{2}$ » » от $x = {}^4/_{15}\tau$ до $x = {}^8/_{15}\tau$;
III. $f(x) = -Isq\sqrt{2}$ » » от $x = {}^8/_{15}\tau$ до $x = {}^4/_3\tau$;
IV. $f(x) = 0$ » » от $x = {}^4/_3\tau$ до $x = {}^8/_5\tau$;
V. $f(x) = +Isq\sqrt{2}$ » » от $x = {}^8/_5\tau$ до $x = 2\tau$.

Интегрирование в неопределенном виде дает

$$\frac{1}{\tau}\int f(x)\cos\frac{\nu'\pi x}{2\tau}\,dx = \frac{2}{\nu'\pi} f(x)\sin\frac{\nu'\pi x}{2\tau} + C. \qquad (5.11)$$

Ниже выписаны произведения значений $f(x)$ и $\sin\frac{\nu'\pi x}{2\tau}$ как верхние и нижние пределы интегрирования для всех интервалов, кроме четвертого, на котором оба они равны нулю, и для всех значений ν' от 1 до 8; множители $Isq\sqrt{2}$, общие для всех произведений, опущены. Знаки при нижних пределах изменены на обратные с тем, чтобы результаты суммирования по столбцам представляли величины, пропорциональные обмоточным коэффициентам; для получения последних достаточно разделить эти

результаты на $4q = 5$, что и сделано в соответствующей строке ($k_{w\nu'}$).

Далее выписаны коэффициенты укорочения шага $k_{y\nu'}$, взятые из приложения 1 для порядков ν' соответственно шагу обмотки $y = 3$, отнесенному к числу пазов на половине периода разложения, т. е. в данном случае на протяжении 2τ, что дает укорочение $\beta = 0{,}4$. Наконец, в последней строке даны коэффициенты распределения $k_{q\nu'}$, вычисленные делением обмоточных коэффициентов $k_{w\nu'}$ на коэффициенты укорочения шага. Как и следовало ожидать, по абсолютным значениям они не отличаются от вычисленных способом проекций в примере 5.4; что же касается знаков, то наблюдаемое в некоторых случаях различие объясняется тем, что коэффициенты разложения в уравнении (4.15) имеют свои знаки, чередующиеся в определенной последовательности, которые и отражаются на знаках коэффициентов распределения, полученных из разложения. При $\nu' = 5$ коэффициент укорочения шага $k_{y\nu'}$ и обмоточный коэффициент $k_{w\nu'}$ имеют нулевые значения, следовательно, их деление имеет неопределенный вид 0 : 0; поэтому значение коэффициента распределения $k_{q\nu'} = 0{,}2000$ взято в скобки.

$\nu' =$	1	2	3	4	5	6	7	8
$\nu =$	$^1/_2$	1	$1^1/_2$	2	$2^1/_2$	3	$3^1/_2$	4
I.	0,8135	1,4863	1,9021	1,9890	1,7231	1,1756	0,4158	—0,4158
	0	0	0	0	0	0	0	0
II.	0,7431	0,9945	0,5878	—0,2079	—0,8660	—0,9511	—0,4067	0,4067
	—0,4067	—0,7431	—0,9511	—0,9945	—0,8660	—0,5878	—0,2079	0,2079
III.	—0,8660	0,8660	0	—0,8660	0,8660	0	—0,8660	0,8660
	0,7431	0,9945	0,5878	—0,2079	—0,8660	—0,9511	—0,4067	0,4067
V.	0	0	0	0	0	0	0	0
	—0,5878	0,9511	—0,9511	0,5878	0	—0,5878	0,9511	—0,9511
Сумма:	0,4392	4,5493	1,1755	0,3005	0	—1,9022	—0,5205	0,5205
$k_{w\nu'} =$	0,0878	0,9099	0,2351	0,0601	0	—0,3804	—0,1041	0,1041
$k_{y\nu'} =$	0,5878	0,9511	0,9511	0,5878	0	—0,5878	—0,9511	—0,9511
$k_{q\nu'} =$	0,1495	0,9567	0,2472	0,1022	(0,2000)	0,6472	0,1095	—0,1095

Дальнейшее продолжение вычислений не требуется, так как все значения будут повторяться с обратными знаками до тех пор, пока не достигнут —0,1495 для порядка $\nu' = 14$ и 0,2000 для $\nu' = 15$.

При составлении графиков МДС всей обмотки из графиков для отдельных фаз необходимо принять во внимание следующее обстоятельство: как следует из рис. 2.30, если имеется в виду одно и то же направление вращения основного поля, то чередование выводов фаз будет прямым при числах пар полюсов $p = 1$, 4, 7, ... и обратным при $p = 2$, 5, 8, ... Поэтому, если чередование выводов фаз остается неизменным, то основная волна разложения двухполюсного поля с периодом 4τ будет иметь направление вращения, противоположное тому, которое имеет основная волна четырехполюсного поля с периодом 2τ. Отсюда следует, что для определения направлений вращения гармонических дробных порядков нужно сначала определить их по правилам, изложенным в § 4.5, как для гармонических целых порядков в двухполюсном поле, и изменить их на обратные, если направление вращения последнего не совпадает с направлением основной волны, как в данном случае.

На рис. 5.17 приведено построение графика МДС для обмотки с числом пазов на полюс и фазу, имеющим нечетный знаменатель, $q = 1^1/_5$ и тем же шагом $y = 3$. Его рассмотрение показывает, что на каждых пяти полюсных делениях форма графика повторяется, только все ординаты изменяют знак на обратный; таким образом, если сдвинуть одну часть графика под другую, как это

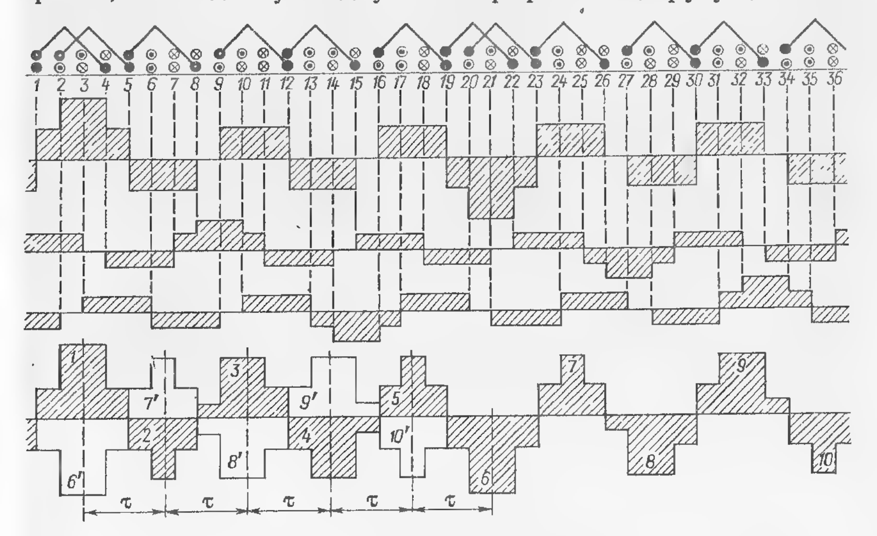


Рис. 5.17. Построение графика МДС обмотки с $q = 1^1/_5$

показано в нижней части, то они окажутся симметричными относительно оси абсцисс. Согласно § 3.1 это означает отсутствие в разложении гармонических всех четных порядков, что и следовало ожидать, поскольку вычисление коэффициентов распределения для такой обмотки показало, что для гармонических четных порядков все они равны нулю.

На каждых пяти полюсных делениях имеются три симметричные и две несимметричные площадки; одна из симметричных и обе несимметричные площадки имеют верхние ступени шириной в два зубцовых деления, которые разделяются при малейшем повороте звезды векторов токов.

Данный шаг $y = 3$ соответствует укорочению $\beta = 3/(3 \cdot 1^1/_5) = 0{,}8333$; оно сильно уменьшает обмоточные коэффициенты для порядков $\nu = 5$ и 7, а также ряда других — 17 и 19, 29 и 31, 41 и 43, ..., хотя ни один из них не обращается в нуль. По отношению к двухполюсному полю данный шаг представляет укорочение

$\beta' = 3/(3 \cdot 5 \cdot 1^1/_5) = 0{,}1667$; оно также не исключает никакой гармонической нечетного порядка. Таким образом, в разложении графика должны быть гармонические порядков 1/5; 1; 7/5; 11/5; 13/5; 17/5; 19/5; 23/5; 5 и т. д.

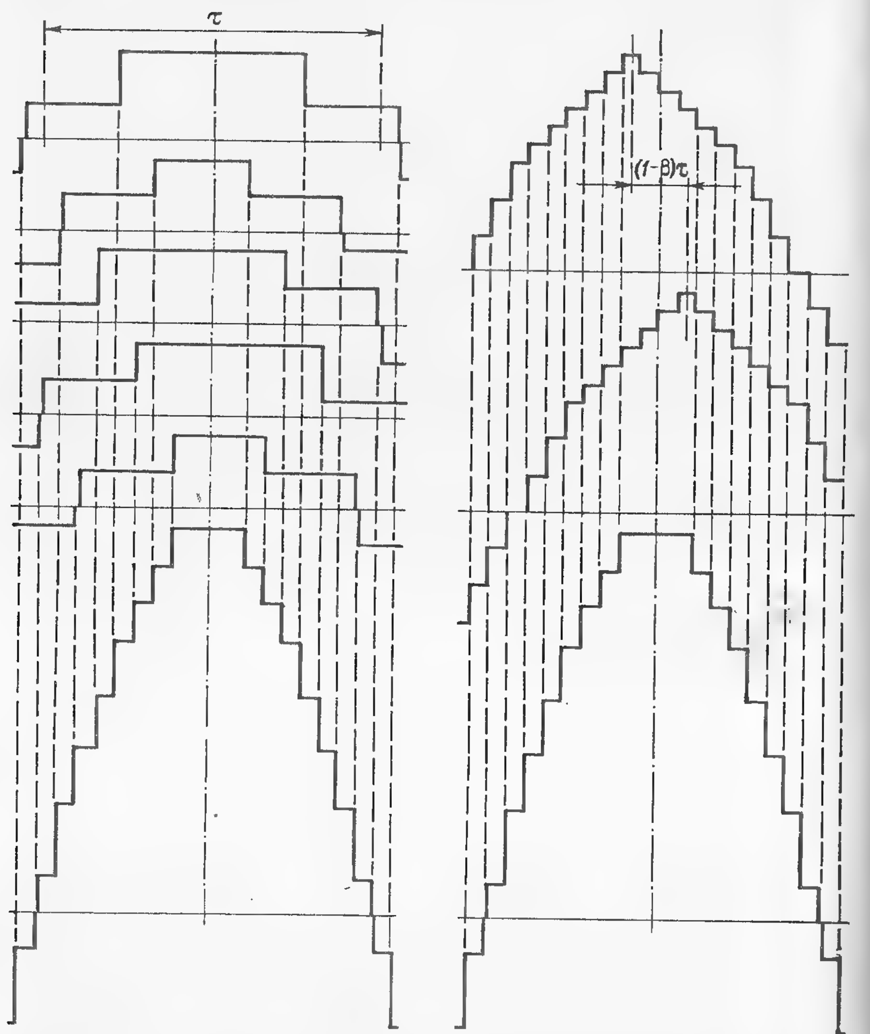


Рис. 5.18. Сопоставление графиков МДС обмоток с $q = 1^1/_5$ и $q' = 6$

На рис. 5.18 в левой части произведено суммирование площадок графиков МДС на всех пяти полюсных делениях подобно тому, как это было сделано на рис. 5.16, а в правой части — графиков МДС двух слоев обмотки с целым числом пазов $q' = 6$ и тем же укорочением шага $\beta = 0{,}8333$; как и в предыдущем случае, оба результирующих графика полностью совпадают. Их ступени

определяются гармоническими зубцовых порядков, первую серию которых представляют $\nu_z = 6 \cdot 6 \mp 1 = 35$ и 37.

В графике МДС на рис. 5.18 зубцовыми порядками являются: первой серии $6^1/_5$ и $8^1/_5$, второй $13^2/_5$ и $15^2/_5$, третьей $20^3/_5$ и $22^3/_5$, четвертой $27^4/_5$ и $29^4/_5$, и только пятую серию представляют целые порядки 35 и 37.

Поскольку и двухполюсная, и десятиполюсная системы имеют согласно § 2.8 одинаковое чередование выводов, направления вращения всех гармонических в обеих одинаковы. Все это можно было бы проверить, применяя такое же разложение графика в гармонический ряд, как и в предыдущем случае, но здесь оно более громоздко, так как число участков, на которые разбивается график, достигает восьми вместо пяти в предыдущем случае.

Если теперь обратиться к обмотке с числом пазов на полюс и фазу $q = 1^2/_{10}$ с любым вариантом распределения сторон секций по пазам, представляющим единичную обмотку, то, поскольку было установлено, что значения коэффициентов распределения для гармонических четных порядков отличны от нуля, эти гармонические будут содержаться в графике ее МДС.

Для обмоток с дробными числами пазов на полюс и фазу остается в силе правило, выведенное из общего вида уравнения МДС в зависимости от линейной координаты и времени, а именно, что скорости движения гармонических составляющих, а при прочих равных условиях и их амплитуды обратно пропорциональны их порядкам. Отсюда следует, что если скорости движения высших гармонических меньше скорости основной волны, то скорости движения низших гармонических должны быть соответственно больше ее, и если амплитуды высших гармонических убывают с увеличением порядков, то амплитуды низших — возрастают. Таким образом, при больших значениях знаменателя d даже относительно малые значения обмоточного коэффициента для составляющей, порядок которой равен единице, деленной на d при нечетном значении последнего или $d/2$ при его четном значении, т. е. самого низшего порядка, способны дать весьма заметную амплитуду этой составляющей, к тому же движущейся с большой скоростью в сторону движения основного поля при нечетных d или против него при четных. Все сказанное лишь в соответственно меньшей степени относится и к прочим составляющим низших порядков; их совокупность является источником добавочных потерь в машине, причем такой категории, которая совершенно отсутствует при целых числах пазов на полюс и фазу.

Следует еще рассмотреть особо порядки, наименее отличающиеся от единицы; при любом значении d их общим видом будет

$$\nu' = \frac{d \mp 2}{d} = 1 \mp \frac{2}{d}. \tag{5.12}$$

Если d нечетно, то $d \pm 1$ оба будут четны, но для них коэффициенты распределения равны нулю; если же d четно, то знамена-

телями всех дробных порядков будет $d/2$, следовательно, и здесь порядки $d \pm 1$ не существуют.

Из каждой пары порядков (5.12) один непременно кратен трем и потому должен быть исключен из рассмотрения; направление движения остающейся гармонической всегда противоположно направлению движения основной волны.

Если бы амплитуды основной волны и такой гармонической были одинаковы, то они образовали бы биение с четко выраженными узлами и пучностями, амплитуда которых достигает удвоенного значения амплитуды основной волны; но в действительности обмоточный коэффициент для гармонической данного порядка ν' значительно меньше, чем для основной волны, и потому совместное действие обеих проявляется в периодической пульсации амплитуды основной волны между двумя значениями, равными сумме и разности амплитуд составляющих. Кроме того, суммарная МДС колеблется относительно некоторого среднего положения; ее движение то несколько ускоряется, то замедляется; впрочем, при реально возможных соотношениях амплитуд это едва заметно.

Расстояние между двумя пучностями при нечетных значениях d равно d полюсным делениям, а при четных — d парам полюсных делений; что касается частоты пульсаций амплитуды, то она равна сумме частот обеих составляющих, т. е.

$$f' = f + f\left(1 \mp \frac{2}{d}\right) = 2f\left(1 \mp \frac{1}{d}\right). \qquad (5.13)$$

Если машина имеет на статоре единичную обмотку с дробным числом пазов, имеющим четный знаменатель d, то в любой момент времени на ее окружности существует одна пучность такого биения, т. е., иными словами, на одной половине окружности магнитное поле обмотки сильнее, чем на другой; в результате возникает одностороннее магнитное тяжение, ведущее к вибрации. Если же знаменатель нечетен, то расстояние от одной пучности до другой будет равно только половине окружности машины и неравномерность магнитного тяжения в значительной степени уравновесится. То же относится и к случаю, когда знаменатель четный, если обмотка не является единичной: на окружности будет существовать столько пучностей, сколько единичных обмоток составляет данную.

При достаточно больших значениях знаменателя d подобные же явления возможны при совместном действии основной волны и одной из гармонических следующей пары с порядками, близкими к единице, а именно вида

$$\nu'' = \frac{d \mp 4}{d} = 1 \mp \frac{4}{d}. \qquad (5.14)$$

Как и в предыдущем случае, один из таких порядков непременно кратен трем и потому отпадает, а остающийся представляет гармоническую, движущуюся против направления движения

Рис. 5.19. Многоугольник Гергеса для обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу

основной волны. Расстояние между двумя пучностями здесь вдвое меньше, чем в предыдущем случае; поэтому опасность возникновения односторонних тяжений значительно ниже.

Если в первой паре остается гармоническая с порядком, меньшим единицы, то во второй паре останется гармоническая с порядком, бо́льшим единицы, и наоборот; поэтому их числителями всегда будет разность в 6 единиц, достаточно большая, чтобы можно было не опасаться последствий возникновения биения гармонических из разных пар, даже если их обмоточные коэффициенты окажутся близкими по своим абсолютным значениям.

Исследование графиков МДС обмоток с дробными числами пазов на полюс и фазу при помощи многоугольников Гергеса в принципе было бы возможно, но практически наталкивается на то затруднение, что многоугольник замыкается при четном d только после $d/2$ обходов, как представлено на рис. 5.19 для обмотки с $q = 2^1/_4$, а при нечетном d — после d обходов; поэтому как построение, так и использование таких многоугольников при сколько-нибудь значительных знаменателях было бы очень кропотливым.

5.7. ПРИМЕНЕНИЕ ДРОБНЫХ ЧИСЕЛ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ

На ранних ступенях развития электрических машин переменного тока, когда их производство носило еще полукустарный характер, применение обмоток с дробными числами пазов ограничивалось целью приспособления имеющихся готовых сердечников или оснастки для их изготовления к машинам с иными числами пар полюсов, нежели те, для которых эти сердечники предназначались. Такие случаи не могли быть массовыми, и если эксплуатационные и экономические показатели машины получались не очень высокими, то с этим можно было мириться; впрочем, уровень знаний об электрической машине далеко не всегда позволял во всем этом разобраться. Подобный подход не исключается и в настоящее время, но теперь имеется возможность достаточно точно оценить последствия применения дробных чисел пазов, и если оно неизбежно, то по крайней мере выбрать наиболее благоприятный вариант распределения сторон секций по полюсным делениям, если их несколько.

Однако уже очень давно удалось обнаружить, что дробные числа пазов позволяют придать обмотке, выполненной на сердечнике с относительно малым общим числом пазов Z, такие электрические и электромагнитные свойства, которые характерны для обмоток с большими целыми числами пазов на полюс и фазу; это стало особенно отчетливым с переходом к двухслойным обмоткам как к основной форме. В первую очередь здесь следует иметь в виду, что даже при очень малых числах пазов возникает возможность подавления высших гармонических ближайших порядков, главным образом $\nu = 5$ и 7, причем в ряде случаев это достигается за счет структуры эквивалентной обмотки; тогда применением подходящего укорочения шага становится возможным подавить гармонические других порядков, например $\nu = 11$ и 13, так что практически останутся только гармонические зубцовых порядков.

Зато при дробных числах пазов появляются составляющие, совершенно не свойственные обмоткам с целыми числами пазов; в первую очередь это относится к гармоническим четных порядков, которые присущи обмоткам с четными значениями знаменателя дроби d. Из них наиболее нежелательными являются гармонические ближайших порядков $\nu = 2$ и 4; с увеличением целой части b их коэффициенты распределения быстро уменьшаются, но при небольших b они могут быть значительными. С этой точки зрения предпочтительны нечетные значения знаменателя d, при которых гармонические четных порядков отсутствуют, но применимость их ограничена тем, что число пар полюсов должно быть кратно знаменателю.

Кроме того, и при четных, и при нечетных значениях знаменателя d, кроме $d = 2$, появляются гармонические дробных порядков, высших и низших, также не свойственные обмоткам с целыми числами пазов. Правда, коэффициенты распределения для гармонических этих порядков обычно невысоки, но даже при таком условии их наличие в графике МДС нежелательно, поскольку как аплитуды, так и скорости движения гармонических низших порядков возрастают обратно пропорционально этим последним.

В § 5.5 было отмечено, что признаком производной обмотки является равенство нулю коэффициента распределения для ЭДС, индуктируемой двухполюсным полем, т. е. гармонической самого низшего из всех возможных порядков; однако неправильным был бы вывод, что это дает преимущество производным обмоткам по сравнению с единичными — производная обмотка имеет меньшее число пазов на полюс и фазу, чем единичная, и потому у нее следует ожидать худший состав коэффициентов распределения.

Особое место занимают гармонические зубцовых порядков. Как и при целых числах пазов, ими являются порядки

$$\nu_z = 6qi \mp 1,$$

но только некоторые из них — целые; большинство этих порядков представляет смешанные дроби вида

$$\nu_z = (6bi \mp 1) + 6\frac{c}{d}i. \qquad (5.15)$$

В табличках чередования порядков, приведенных в рассмотренных примерах, такие порядки расположены все без исключения в одном столбце — под порядком $\nu = 1$, т. е. основной волной. Отличие от целых чисел пазов состоит здесь в том, что при последних между зубцовыми порядками каждой серии заключен только один порядок, да и тот четный — $6qi$, в то время как при дробных числах пазов между двумя зубцовыми порядками каждой серии заключено тем больше порядков, главным образом дробных (хотя иногда и один целый, кратный трем), чем больше знаменатель d; их число равно $d - 1$.

В отношении индуктирования ЭДС все эти многочисленные дробные зубцовые порядки не представляют недостатка, так как трудно ожидать наличие составляющих таких порядков в поле индуктора; но с точки зрения состава МДС, создаваемой самой обмоткой, они ведут себя так же, как и гармонические целых порядков, — перемещаясь со скоростями, обратно пропорциональными порядкам, индуктируют в создающей их обмотке ЭДС основной частоты. В целом обмотки с дробными числами пазов в отношении гармонических зубцовых порядков не выделяются из общего ряда, так как насыщенность гармоническими этих порядков является средней между обмотками с теми целыми числами пазов, между которыми заключено данное дробное, т. е. $q = b$ и $q = b + 1$. Так, например, при знаменателе $d = 4$ и целой части $b = 2$ зубцовые порядки имеют следующие значения:

Число пазов q	2	$2^1/_4$	$2^2/_4$	$2^3/_4$	3
Зубцовые порядки ν_z серий:					
1	11 и 13	$12^1/_2$ и $14^1/_2$	14 и 16	$15^1/_2$ и $17^1/_2$	17 и 19
2	23 и 25	26 и 28	29 и 31	32 и 34	35 и 37
3	35 и 37	$39^1/_2$ и $41^1/_2$	44 и 46	$38^1/_2$ и $40^1/_2$	53 и 55
4	47 и 49	53 и 55	59 и 61	65 и 67	71 и 73

Целыми четными зубцовые порядки могут быть только в одном случае — когда, как здесь, $c/d = 1/2$.

Действующими стандартами СССР для односкоростных асинхронных двигателей мощностью до 100 кВт нормализованы числа пар полюсов от 1 до 5, причем последние из них — только для более крупных из охватываемых стандартом мощностей; для двигателей мощностью свыше 100 и до 1000 кВт к ним начиная с 200 кВт добавляется еще $p = 6$. Примерно то же самое имеет место и для синхронных двигателей и генераторов в этом диапазоне мощности. При мощностях от 1250 кВт и выше для асинхронных двигателей добавляются числа пар полюсов 8, 10 и 12, а для синхронных двигателей — также 16, 18, 20, 24 и 30. Для синхронных генераторов, кроме гидрогенераторов, при мощностях

от 1250 кВт установлены числа $p = 2, 3, 4, 5, 8$ и 10. Гидрогенераторы при мощностях от 125 до 1000 кВт могут иметь числа пар полюсов $p = 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 20$ и 24; но для гидрогенераторов большей мощности числа пар полюсов не нормализованы.

Таким образом, в пределах машин нормализованных мощностей возможности применения дробных чисел пазов на полюс и фазу весьма ограниченны: для машин мощностью до 1000 кВт их знаменатели не могут превзойти 5, а для более крупных они составляются преимущественно из множителей 2 и 5 и лишь изредка 7. Отсюда следует, что в рассматриваемых пределах мощностей для обмоток трехфазного тока возможны знаменатели 2, 4, 5, 7, 8, 10, 14, 16, 20; однако для гидрогенераторов и иногда крупных тихоходных синхронных двигателей возможны еще знаменатели 11, 13, 17, 19, 22, 23 и т. д., причем было бы трудно указать их верхний предел. Следует, однако, иметь в виду, что чем выше знаменатель, тем меньше возможность иметь в обмотке параллельные ветви; поэтому с увеличением мощности машин, когда необходимо иметь более или менее значительное число параллельных ветвей, это обстоятельство способно оказать влияние даже на выбор числа пар полюсов, заставляя ограничивать его такими значениями, которые могут быть разложены на достаточные первоначальные множители.

Наибольшее распространение дробные числа пазов на полюс и фазу получили в американской практике, где их применение исследовано очень тщательно; поэтому заслуживают внимания рекомендации по выбору варианта распределения сторон секций по полюсным делениям, представленные в приложении 17, где даны числа с целой частью $b = 1$, знаменателями d от 5 до 25 и числителями c, меньшими $d/2$. Это приложение пригодно и для всякого иного значения b, для чего достаточно заменить 1 на b и 2 — на $b + 1$; что касается значений числителя c, превосходящих $d/2$, то для них нужно пользоваться распределениями для его значений, равных $d - c$, заменяя единицу двойкой и двойку единицей. Последняя цифра в рядах для четных значений d, заключенная в скобки, представляет повторение первой цифры ряда подобно тому, как это сделано в приложении 15. Таблица приложения 17 не содержит сократимых дробей, хотя содержащиеся в ней данные могли бы быть распространены и на них. Принцип построения таблицы достаточно ясен: приведенные в ней распределения подобраны так, чтобы получать наивысшее значение коэффициента распределения для основной волны; однако она может быть безоговорочно применена только для петлевых обмоток, в которых нет препятствий для любого распределения. В следующей главе показано, что для волновых обмоток число беспрепятственно выполнимых вариантов распределения сильно ограничивается, так что далеко не каждый из рекомендуемых вариантов может быть принят.

5.8. ОБМОТКИ С ДРОБНЫМИ ЧИСЛАМИ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ, МЕНЬШИМИ ЕДИНИЦЫ

Все рассмотренные до сих пор обмотки с дробными числами пазов на полюс и фазу имели целую часть b смешанной дроби, равную по крайней мере единице, и на каждом полюсном делении эти обмотки имели по меньшей мере по одной стороне секций, так что можно было четко различать распределение секций. Однако нет препятствий к тому, чтобы положить $b = 0$, т. е. придать числу пазов на полюс и фазу вид $q = c/d$. Метод получения обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу, меньшим единицы, может быть представлен подобно рассмотренному в § 5.1: из обмотки с целым числом q, в данном случае равным единице, и достаточным числом пар полюсов удаляется число секций, необходимое для получения данного дробного числа.

Пусть, например, требуется получить обмотку с числом пазов на полюс и фазу $q = 3/4$. В качестве исходной может быть взята либо однослойная равносекционная восьмиполюсная обмотка, либо двухслойная четырехполюсная; при числе $q = 1$ обе они имеют по четыре секции в фазе и удалению подлежит одна секция с тем, чтобы три оставшиеся дали требуемое число $q = 3/4$.

На рис. 5.20, *а* представлен первый из этих двух случаев. Как и в § 5.1, после удаления из каждой фазы по одной секции оставшиеся сдвигаются так, чтобы не оставалось пустых мест в пазах, где лежали стороны удаленных секций, и это отмечено двойной нумерацией пазов на рис. 5.20, *б*. В результате обмотка распалась на три группы секций, в каждую из которых входит по одной секции от всех фаз; при этом шаги секций оказались неодинаковыми — секции, лежащие в серединах групп, имеют больший шаг, чем расположенные по обе стороны от них, как показано на рис. 5.20, *в*.

Чтобы выравнять шаги и заодно устранить перекрещивания лобовых частей, можно поменять местами стороны секций с большим и меньшим шагами, как на рис. 5.20, *г*; но тогда получившийся шаг, равный всего лишь одному зубцовому делению, окажется слишком мал. Однако если собрать стороны соседних секций в общие пазы, как показано на рис. 5.20, *д*, то ширина секций станет равной 8/9 полюсного деления и ей будет соответствовать вполне приемлемое значение коэффициента укорочения шага $k_y = \sin(8/9 \cdot \pi/2) = \sin 80° = 0{,}9848$. Стороны секций в этих пазах могли бы лежать и не рядом, а одна над другой, т. е. в результате всех преобразований получилась бы двухслойная обмотка; это, однако, было бы менее удобно по причинам, излагаемым несколько далее.

В нижней части рис. 5.20 представлены графики МДС получившейся обмотки для двух обычно рассматриваемых моментов времени; в них отчетливо выражены гармонические низших и четных порядков, сильно искажающие и без того грубую форму графиков

при $q = 1$; на графиках тонкой линией нанесена без соблюдения масштаба ординат синусоида основной частоты, т. е. $\nu = 1$.

Если теперь в качестве исходной принять четырехполюсную двухслойную обмотку с $q = 1$ (рис. 5.21), то в результате аналогичных операций получится тоже двухслойная обмотка, но с вдвое меньшим шагом, следовательно, с очень низким значением коэффициента укорочения шага $k_y = \sin(4/9 \cdot \pi/2) = \sin 40° = 0{,}6428$;

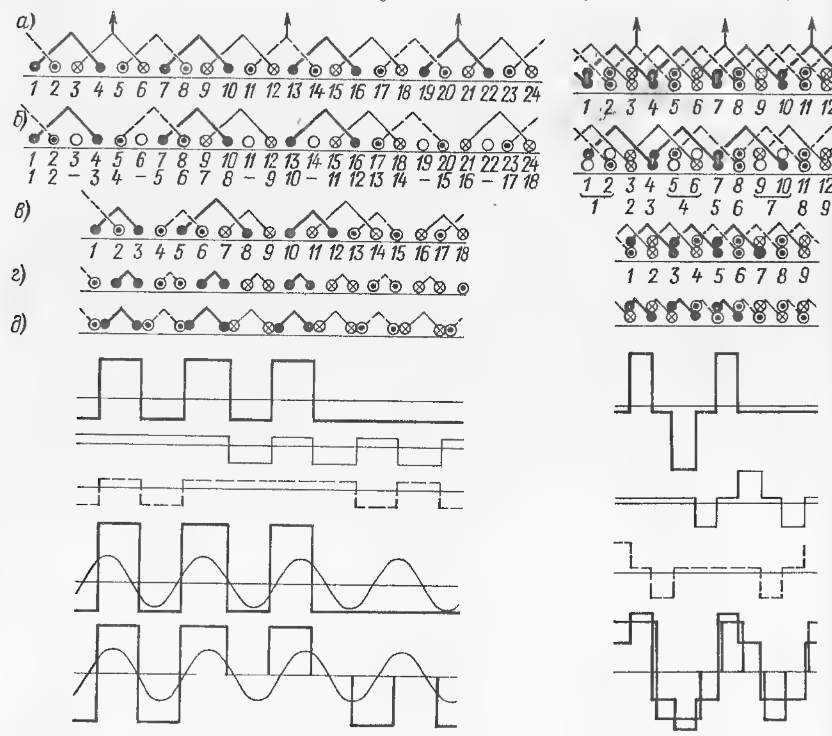


Рис. 5.20. Получение обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу, меньшим единицы, из однослойной равносекционной обмотки

Рис. 5.21. Получение обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу, меньшим единицы, из двухслойной обмотки

зато графики МДС у нее значительно лучше, чем у предыдущей, хотя по-прежнему в них обнаруживается присутствие гармонических низших и четных порядков.

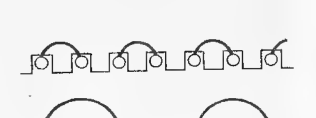
Обмотки подобного рода могут встречаться только в машинах самых небольших мощностей; их применению препятствует прежде всего необходимость иметь большое число пар полюсов, что в машинах малой мощности встречается исключительно редко — если требуется низкая частота вращения, то проще применить быстроходный двигатель с редуктором. Однако в сравнительно недавнее время возникла идея применения обмоток с дробными

числами пазов на полюс и фазу, меньшими единицы, для машин с органически присущими им большими числами пар полюсов — гидрогенераторов. Смысл этого состоит в том, чтобы таким образом можно было изготовить машину с необычайно высоким напряжением, способную работать непосредственно на линию высоковольтной передачи без применения повышающего трансформатора; желаемое напряжение при этом во всяком случае выше 100 кВ. Считается приемлемым, чтобы потери в такой машине были на уровне суммы потерь в генераторе нормального исполнения и соответствующем трансформаторе.

Изоляция обмотки якоря обычных видов не может быть выполнена на такие напряжения; естественно применить здесь такую же изоляцию, как в трансформаторах — бумажную в жидком диэлектрике; но это требует, чтобы элементы обмотки имели как можно более простую форму, в частности перекрещивания лобовых частей крайне нежелательны. Тогда каждый элемент обмотки будет представляться в виде многовитковой плоской четырехугольной катушки с сильно закругленными углами, заключенной в резервуар из неэлектропроводного и немагнитного материала. Охлаждение обмотки может при этом обеспечиваться принудительной циркуляцией диэлектрика, что не представляет задачи особой сложности.

Такие элементы не могут быть уложены в пазы обычного якоря. Одним из предлагаемых решений является прикрепление приставных зубцов к внутренней поверхности сердечника якоря, подобных сердечникам явновыраженных полюсов индуктора; на эти зубцы надеваются резервуары с катушками; никакому деформированию при сборке они не должны подвергаться. При этом катушки могут надеваться либо на каждый такой зубец, и тогда в промежутках между соседними зубцами будут находиться две стороны катушек («двухслойная» обмотка), либо через один зубец, и тогда между последними будет только по одной стороне катушки («однослойная» обмотка). Таким образом, число катушек в машине может быть либо равным числу зубцов, либо вдвое меньшим. При этом следует учитывать, что поместить в каждый промежуток между зубцами по две стороны катушек значительно труднее, чем по одной, и во всяком случае их было бы крайне неудобно располагать одну над другой. Это все показано на рис. 5.22.

Роль шага обмотки здесь играет ширина катушки, и укорочением шага следует считать отношение этой ширины к полюсному делению; оба могут быть выражены как в линейных, так и в угловых мерах. Для достаточного использования объема машины желательно,



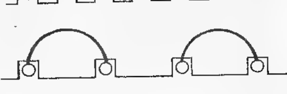


Рис. 5.22. Размещение катушек при разном числе зубцов

чтобы укорочение шага было как можно ближе к единице, однако равным ей оно быть не может, потому что при равенстве чисел полюсов индуктора и зубцов якоря неизбежной была бы пульсация магнитного потока, которая сделала бы работу машины невозможной. Поэтому эти числа должны несколько отличаться одно от другого, например число зубцов на 20—30 % больше числа полюсов; отсюда следует, что число пазов на полюс и фазу должно быть близко к 1/2.

Для предотвращения одностороннего тяжения при нарушении симметрии нагрузки фаз желательно, чтобы секции обмотки каждой фазы были по возможности равномерно распределены по окружности якоря; при нечетных значениях знаменателя d это обеспечивается тем, что обмотка состоит из двух одинаковых половин, но при четных это может быть полностью достигнуто только тогда, когда обмотка с данным числом пазов на полюс и фазу не является единичной.

Распределение секций каждой фазы может быть выполнено различными способами, число которых возрастает с увеличением числителя c; но пригодными могут быть только те из них, которые обеспечивают его единообразие во всех фазах. Что касается порядка соединения секций между собой, то при числах $q \geqslant 1$ это не вызывает никаких затруднений, поскольку на каждом полюсном делении находится по крайней мере одна секция и секции соседних полюсных делений должны соединяться между собой так, чтобы их обходы были противоположны; но при $q \leqslant 1$ такая очевидность теряется и направления обходов должны устанавливаться путем определения фазы ЭДС каждой секции, индуктированной полем индуктора, чтобы исключить возможность встречного включения ЭДС отдельных секций.

Пример 5.10. На сердечнике с числом зубцов $Z = 42$ требуется выполнить обмотку с числом пар полюсов $p = 16$; таким образом, число пазов на полюс и фазу $q = 7/16$. Распределение секций, удовлетворяющее единообразному, может быть выполнено восемью способами:

1. 1 1 1 1 1 1 1
2. 1 0 1 1 1 1 1 0 1
3. 1 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1
4. 1 1 0 0 1 1 1 0 0 1 1
5. 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 0 0 1
6. 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1
7. 1 1 0 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1
8. 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1

Если приписать номер 0 секции, находящейся в середине всех этих распределений, то положения остальных секций в тридцатидвухполюсном поле будут определяться произведениями их номеров на угол между двумя соседними секциями $\alpha = 16\pi/42$; всего таких произведений будет 7, потому что номера *7* и *8* данной фазой не используются ни в одном из распределений. Им соответствуют следующие значения косинусов:

Номер секции	1	2	3	4	5	6	9
$\cos\alpha$	—0,7331	0,0747	0,6235	—0,9888	0,8262	—0,2225	—0,9010

Суммирование значений косинусов показывает, что наибольшее значение этой суммы получается для варианта распределения 4 и дает значение коэффициента распределения для основной волны $k_{q1} = 0{,}8709$ при условии, что секции с номерами 1 и 4 (по обе стороны от середины) обходятся в направлениях, противоположных обходам секций с номерами 0 и 5. Коэффициент укорочения шага вычисляется по общим правилам по укорочению, которое можно представить как отношение числа полюсов к числу зубцов:

$$k_{y1} = \sin\left(\frac{2p}{Z}\frac{\pi}{2}\right) = 0{,}9309;$$

таким образом, обмоточный коэффициент равен

$$k_{w1} = 0{,}8709 \cdot 0{,}9309 = 0{,}8107.$$

Общим недостатком обмоток с числами пазов на полюс и фазу, меньшими единицы, является исключительно высокая насыщенность их МДС гармоническими дробных порядков, имеющими значительные амплитуды. Создаваемые ими магнитные поля, особенно низших порядков, вызывают большие добавочные потери на поверхности полюсов индуктора, отводить которые можно только применением водяного охлаждения, что сильно осложняет конструкцию машины и хотя в какой-то степени может быть оправдано отсутствием трансформатора, но представляет трудно разрешимую задачу, поскольку объем машины остается близким к обычному, а выделяемые потери возрастают примерно в полтора раза.

Особенно вредной в этом отношении является гармоническая самого низшего порядка $\nu = 1/p$, т. е. двухполюсная, вращающаяся с частотой, в p раз большей, чем синхронная, и с амплитудой, пропорциональной произведению ее обмоточного коэффициента на число пар полюсов p. Ей сопутствуют еще и гармонические порядков $\nu = 2/p$, $4/p$ и т. д. В этом отношении более удачными являются обмотки с числами пазов на полюс и фазу с нечетными знаменателями d, МДС которых не содержит гармонических частоты $1/p$ и всех четных порядков; самым низшим порядком для них является $5/p$.

Дальнейшим усовершенствованием обмоток данного вида является попытка усложнения формы катушек путем придания им формы двухъярусной катушечной обмотки, что позволяет удвоить число зубцов и довести числитель c до значения, близкого к знаменателю d; этим в значительной степени ослабляются все явления, описанные выше, но тогда логическим следствием является доведение числа пазов на полюс и фазу до единицы, позволяющее устранить гармонические всех дробных порядков, а для подавления гармонических зубцовых порядков применить ступенчатые наконечники полюсов индуктора.

5.9. ОБМОТКИ ШЕСТИФАЗНОГО ТОКА С ДРОБНЫМИ ЧИСЛАМИ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ

Расщепление фаз обмотки трехфазного тока с целым и четным числом пазов на полюс и фазу q для получения обмотки шести-

фазного тока дает в результате обмотку с целым же числом пазов на полюс и фазу $q' = q/2$, фазы которой сдвинуты в пространстве точно на 30° и вполне симметричны; поскольку такие обмотки всегда могут быть приведены к диаметральному шагу, коэффициенты распределения для всех гармонических четных порядков равны нулю.

Однако в отдельных случаях может понадобиться расщепить фазы двухполюсной обмотки трехфазного тока с нечетным числом пазов на полюс и фазу; полученная в результате этого расщепления обмотка будет иметь дробное число пазов на полюс и фазу:

$$q' = \frac{q-1}{2} + \frac{1}{2}.$$

Такая обмотка обладает уже другими свойствами, которые можно рассмотреть на простейшем примере обмотки с $q = 3$ и $q' = 1^1/_2$; хотя столь малое число пазов на полюс и фазу и нереально, но она обладает всеми признаками этих обмоток, притом выраженными в особо сильной степени.

Расщепление фаз может быть выполнено различными способами; обозначая части каждой расщепленной фазы через *а* и *б*, их можно представить, например, так:

Способ I:						
Фазы	2	1	3	2	1	3
	а б б	*а а б*	*а б б*	*а а б*	*а б б*	*а а б*
	а а б	*а б б*	*а а б*	*а б б*	*а а б*	*а б б*
Способ II:						
Фазы	2	1	3	2	1	3
	а б	*а а б б*	*а б*	*а а б б*	*а б*	*а а б б*
	а а б б	*а б*	*а а б б*	*а б*	*а а б б*	*а б*

Каждой стороне секции в любом слое при этих способах распределения всегда соответствует сторона секции в другом слое, отстоящая от первой на шаг обмотки; поэтому обмоточные коэффициенты как для основной волны, так и для гармонических всех нечетных порядков могут быть получены умножением соответствующих коэффициентов распределения на коэффициенты укорочения шага. В то же время, хотя состав групп обеих частей расщепленной фазы одинаков, но расположения групп на разных полюсных делениях различны, следовательно, обмоточные коэффициенты для гармонических четных порядков перестают быть равными нулю.

Вычисление обмоточных коэффициентов облегчается тем, что при любом числе пазов на полюс и фазу и любом шаге, кроме диаметрального, в нем должны участвовать не все активные стороны секций, а только те, которым на другом полюсном делении нельзя подыскать парные, потому что во всех прочих сторонах гармонические всех четных порядков взаимно компенсируются. Пусть, например, имеются обмотки с числами пазов $q = 5$ и $q' = 2^1/_2$ и с различными укорочениями шага (кроме диаметрального, при котором коэффициенты для гармонических всех четных по-

рядков равны нулю); при способе расщепления I их распределения будут выглядеть так:

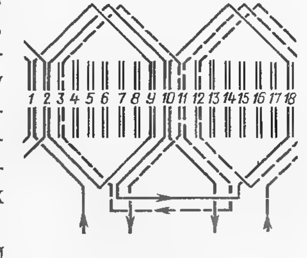
Шаг обмотки	$y = 14$	$y = 13$	$y = 12$
Первое полюсное деление	*а а* ***а*** *б б*	*а а* ***а*** *б б*	*а а* ***а*** *б б*
	а а ***б*** *б б*	*а а* ***б*** *б б*	*а а* ***б*** *б б*
Второе полюсное деление	*а а* ***б*** *б б*	*а а* ***б*** *б б*	*а а* ***б*** *б б*
	а а ***а*** *б б*	*а а* ***а*** *б б*	*а а* ***а*** *б б*

Жирным шрифтом выделены стороны секций, которым нельзя подобрать парные; они-то и участвуют в вычислении обмоточных коэффициентов для гармонических четных порядков. Эти стороны в части *а* составляют самую правую секцию группы, а в части *б* — наоборот, самую левую. Если произвести аналогичные построения при способе II, то окажется, что, наоборот, в части *а* такие секции являются самыми левыми, а в части *б* — самыми правыми. Отсюда следует, что численно обмоточные коэффициенты для гармонических четных порядков равны коэффициентам укорочения шага для этих порядков, деленным на число пазов на полюс и фазу q:

$$k_{w\nu} = k_{y\nu}/q \quad (\nu \text{ — четное}).$$

На рис. 5.23 даны схемы обмоток с $q = 3$, подразделенных обоими способами, но уже не с диаметральным шагом, как было представлено при объяснениях способов I и II, а с укороченным; при этом обмотка, полученная способом I, — с выводом обеих частей фазы на одну и ту же сторону машины, а полученная способом II — на разные стороны, что разгружает зону лобовых частей, но приводит к увеличению числа вариантов стержней.

Возможен еще такой способ расщепления фаз, при котором начала и концы частей расщепленной фазы оказываются по разные стороны машины, однако свойства получаемых при этом обмоток во всех отношениях хуже, чем у получаемых описанными способами, и потому здесь этот способ не рассматривается, несмотря на то, что при нем обмоточные коэффициенты для всех четных порядков равны нулю.



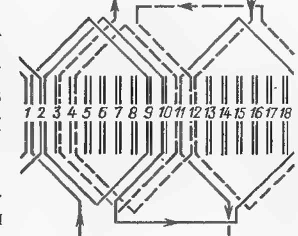


Рис. 5.23. Два способа размещения секций обмотки шестифазного тока с дробным числом пазов на полюс и фазу

При четных числах пазов на полюс и фазу исходной обмотки трехфазного тока точка расщепления каждой фазы лежит на окружности, описанной вокруг ломаной линии, составленной из векторов ЭДС всех секций; но при нечетном q и

дробном q' эта точка смещается с окружности. На рис. 5.24 дано такое построение для обмотки с $q = 3$, фазы которой расщеплены способом I. Точка расщепления B' сместилась из положения B на окружности по направлению к центру; если принять радиус окружности за единицу, то расстояние точки B от центра будет равно $\cos \alpha/2 = \cos (360°/12q)$.

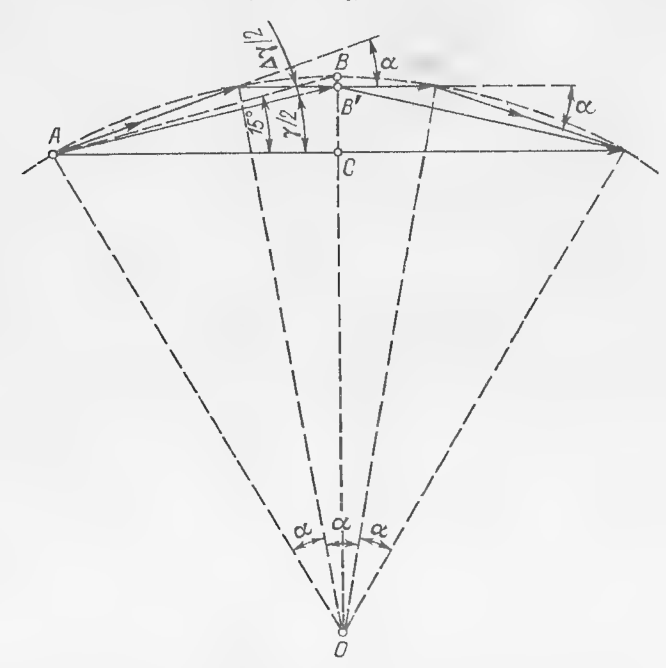


Рис. 5.24. Диаграмма сложения ЭДС пазов обмотки шестифазного тока с дробным числом пазов на полюс и фазу

Прямоугольные треугольники ACB и ACB' имеют общий катет AC, длина которого в данном масштабе равна 0,5; длина второго катета в первом треугольнике

$$\overline{CB} = \overline{OB} - \overline{OC} = 1 - \cos 30°,$$

а во втором

$$\overline{CB}' = \overline{OB}' - \overline{OC} = \cos \alpha/2 - \cos 30°.$$

Угол при вершине A в первом треугольнике составляет 15°, а во втором определяется равенством

$$\operatorname{tg} \angle A = \frac{\overline{CB'}}{\overline{AC}} = \frac{\cos \alpha/2 - \cos 30°}{0{,}5}.$$

Сдвиг между частями расщепленной фазы равен удвоенному значению найденного таким образом угла; с увеличением числа

пазов на полюс и фазу он стремится к нулю. При укорочении шага модуль вектора ЭДС каждой секции уменьшается пропорционально коэффициенту укорочения, но одновременно настолько же уменьшается и радиус окружности; таким образом, диаграмма остается себе подобной и сдвиг между ЭДС частей расщепленной фазы не зависит от укорочения шага. Это последнее целесообразно принимать, как и для обмоток шестифазного тока с целыми числами пазов на полюс и фазу, ближайшим к $\beta = 11/12$, но равным этому значению оно ни при каком конечном числе q' стать не может.

Несколько труднее было бы произвести подобное же построение для способа II, но конечный численный результат его получается тем же самым. Ниже приведены основные данные, характеризующие расщепление фаз обоими способами:

Число пазов на полюс и фазу:					
q	3	5	7	9	11
q'	$1^1/_2$	$2^1/_2$	$3^1/_2$	$4^1/_2$	$5^1/_2$
Угол γ между частями фазы . .	26° 43′ 39″	28° 49′ 32″	29° 24′ 06″	29° 38′ 17″	29° 44′ 32″
Отклонение γ от 30° ($\Delta\gamma$) . . .	3° 16′ 21″	1° 10′ 28″	0° 35′ 54″	0° 21′ 43″	0° 15′ 28″
Оптимальное укорочение шага β	8/9	14/15	19/21	25/27	10/11
Коэффициент распределения k_{q1}	0,9865	0,9878	0,9882	0,9883	0,9884
Коэффициент укорочения шага k_{y1}	0,9848	0,9945	0,9888	0,9932	0,9784
Обмоточный коэффициент k_{w1} . .	0,9715	0,9824	0,9771	0,9817	0,9784
Обмоточный коэффициент для $\nu = 2$	0,1140	0,0416	0,0421	0,0256	0,0256

Обмоточные коэффициенты для гармонических более высоких четных порядков ($\nu = 4$ и 8) возрастают медленнее, чем пропорционально этим порядкам, и потому содержание этих гармонических в графиках МДС обмоток убывает с повышением их порядков. В целом можно считать, что, за исключением самого меньшего из чисел пазов на полюс и фазу $q = 1^1/_2$, показатели обмоток достаточно удовлетворительны и в случае необходимости такие обмотки могут быть допущены к применению, например в двигателях переменного тока, которые предназначаются для работы с регулируемой частотой вращения при питании от статических преобразователей частоты и могут иметь очень умеренную мощность, а потому и невысокие числа пазов на полюс и фазу.

Подобный принцип расщепления фаз может быть применен и при числе пар полюсов $p = 2$, но при дальнейшем повышении последнего в нем вряд ли может возникать острая необходимость.

Глава шестая

ВОЛНОВЫЕ ОБМОТКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

6.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВОЛНОВЫХ ОБМОТКАХ

Хотя петлевые обмотки являются основной формой обмоток машин переменного тока и ими снабжаются машины большинства видов, но в некоторых случаях благодаря своим специфическим свойствам предпочтительны волновые обмотки. Их основной особенностью является то, что они обходят всю окружность машины и потому нечувствительны к неравномерностям зазора между вращающейся и неподвижной частями машины.

Этим и определяется область применения волновых обмоток — именно в тех видах машин переменного тока, в которых более всего приходится ожидать неравномерность зазора. Среди синхронных машин такими являются гидрогенераторы, в основном с вертикальным валом — многополюсные машины с относительно малым зазором и большим диаметром, при котором бывает очень трудно обеспечить одинаковость зазора по всей окружности, а среди асинхронных машин — двигатели с фазным ротором.

Многовитковые волновые обмотки в бесколлекторных машинах переменного тока обычно не применяются, так как их выполнение затруднительно; они всегда являются многофазными и могут иметь любое число фаз, заполняя при этом все пазы на окружности данной части машины. Полный шаг обмотки y, равный сумме частичных шагов y_1 и y_2, должен быть близок к удвоенному числу пазов на полюс:

$$y = y_1 + y_2 \approx 2Q = 2qm; \tag{6.1}$$

однако если это будет соблюдено по всей окружности данной части машины, то после первого же обхода этой окружности обмотка должна была бы замкнуться накоротко, заняв только незначительную часть общего числа всех пазов; таким путем можно было бы получить только короткозамкнутую обмотку с числом фаз, равным qm, и для того чтобы этого не произошло, последний шаг приходится делать отличающимся от прочих, обычно на единицу; тогда следующий обход будет начат от паза, соседнего с тем, от которого был начат предыдущий, и т. д. Нечто подобное встречается в обмотках коллекторных якорей с так называемыми *мертвыми секциями* или *искусственно замкнутых*, как показано в главе восьмой.

Полный шаг волновой обмотки y может быть разбит на частичные шаги y_1 и y_2 различным образом. Если $y_1 = y_2$, что можно сделать вследствие четности полного шага, то секции будут диаметральными и вылеты лобовых частей по обе стороны машины — одинаковыми. Однако нет препятствий к тому, чтобы сделать частичные шаги неравными; если, например, принять $y_1 < y_2$, т. е. укоротить первый частичный шаг, то соответственно удлинится второй, и вылеты обмотки по обе стороны машины станут неодинаковыми, а электрические свойства обмотки несколько изменятся.

Отличие последнего полного шага каждого обхода от прочих делается за счет второго частичного шага y_2, которому придается местное значение

$$y_2' = y_2 \pm 1. \tag{6.2}$$

Знак плюс дает обмотку, которая после одного обхода приходит в паз, лежащий после начала обхода; с каждым новым обходом она будет продвигаться вперед и потому носит название *прямоходовой* или правой. Знак минус дает обмотку, не доходящую до начала обхода, с каждым новым обходом отступающую назад и носящую название *обратноходовой* или левой. Свойства обеих обмоток вполне одинаковы, и выбор между ними определяется главным образом конструктивными соображениями и практикой, установившейся на данном предприятии; прямоходовая обмотка ведет к некоторому увеличению расхода проводниковых материалов.

После того как обмотка сделает q полных обходов, каждая ее фаза займет в пазах половину отведенных для нее мест; чтобы заполнить вторую половину, нужно повторить выполненную укладку, но отступя в любую сторону ровно на одно полюсное деление. В результате в каждой фазе окажется по два начала и по два конца обходов; если принять одно из начал за начало фазы, а оба конца соединить между собой перемычкой, то второе начало станет концом фазы, соединенной последовательно. Однако поскольку обе половины фазы одинаковы и лишь сдвинуты одна относительно другой на полюсное деление, их можно соединить и параллельно так, чтобы направления обходов сохранились.

На рис. 6.1 даны схемы четырехполюсных волновых обмоток с числом пазов на полюс и фазу $q = 3$, одна из которых — обратноходовая с последовательным соединением, а другая — прямоходовая с параллельным соединением.

Если, как на данном рисунке, начало каждой половины фазы лежит в нижнем слое обмотки, то ее конец — в верхнем, или наоборот; но так как начало второй половины становится концом фазы, то выводы фазы при последовательном соединении половин лежат в одном и том же слое, а перемычка между ними находится в другом слое, и это в общем удобно. Но при параллельном соединении половин приходится соединять половины фазы в разных слоях, что уже менее удобно, особенно когда место для лобовых частей обмотки ограничено. Таким образом, волновая обмотка

переменного тока мало приспособлена к устройству параллельных ветвей, и потому областью ее применения должны быть случаи, когда при относительно высоком напряжении обмотка должна иметь сравнительно небольшой ток.

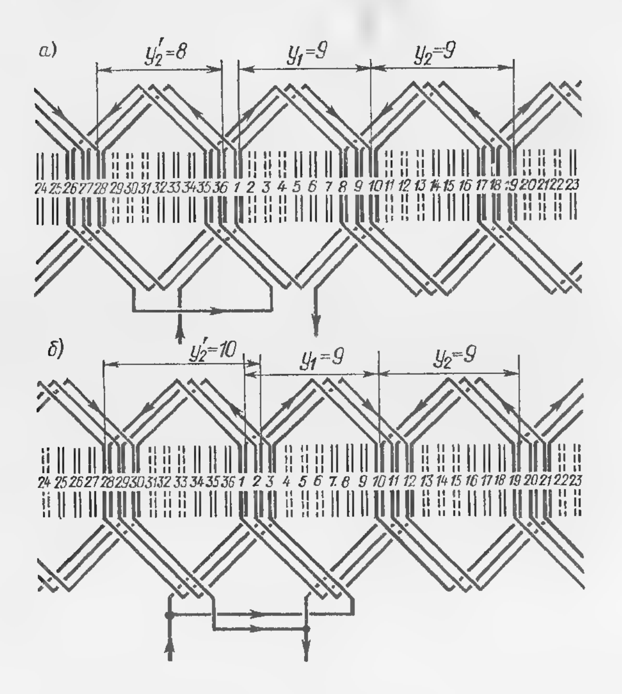


Рис. 6.1. Волновые обмотки: *а* — обратноходовая с последовательным соединением; *б* — прямоходовая с параллельным соединением

То обстоятельство, что волновая обмотка обегает многократно окружность машины и таким образом выравнивает погрешности сборки, само по себе не является ее преимуществом по сравнению с петлевой, имеющей то же самое число параллельных ветвей, т. е. последовательное соединение всех секций фазы; однако отличительной особенностью волновой обмотки является отсутствие междуполюсных соединений (за исключением перемычки между половинами фазы), между тем как в петлевой обмотке эти соединения требуют наличия определенного места, которое не всегда имеется. Зато лобовые части и их вылеты в петлевой обмотке уменьшаются по мере укорочения шага, в то время как в волновой обмотке укорочение шага уменьшает длину и вылет лобовых частей с одной стороны машины, но настолько же увеличивает их с другой; более подробно этот вопрос рассмотрен в § 6.3.

В обмотках переменного тока нет различных вариантов выполнения секций, как в обмотках якорей коллекторных машин; в большинстве случаев волновые обмотки выполняются стержневыми полусекциями, которые после укладки в пазы соединяются между собой хомутиками, как показано на рис. 2.38. Если обмотка находится в открытых пазах, то полусекции, заготовляемые отдельно от машины, отличаются от полусекций петлевой обмотки тем, что лобовые части отгибаются в разные стороны (рис. 6.2). Местное значение частичного шага y_2' может быть достигнуто двумя способами: либо соответствующие полусекции изготовляются с надлежаще укороченной (или удлиненной) лобовой частью со стороны выводов, либо все полусекции выполняются одинаковыми, но соединяются между собой фасонными

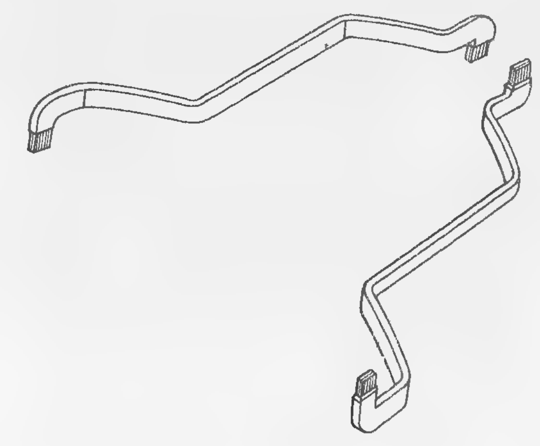


Рис. 6.2. Полусекции двухслойной волновой обмотки

хомутиками, как на рис. 6.3, что и дает необходимое изменение шага; с точки зрения унификации производства полусекций последнее предпочтительнее.

Подобно петлевым, волновые обмотки могут быть не только двухслойными, но и однослойными, и в этом случае оба частичных шага должны быть нечетными, поскольку обмотка обходит пазы попеременно нечетной и четной нумерации; при нечетных числах пазов на полюс и фазу это не встречает никаких препятствий, но при четных не может существовать равенство первого и второго частичных шагов. Как и петлевая, такая обмотка не может иметь диаметральный шаг, который был бы четным.

Для примера на рис. 6.4 дана схема однослойной волновой обмотки с $q = 3$ и диаметральными частичными шагами $y_1 = y_2 = 9$; местное значение второго частичного шага $y_2' = 7$, которое тоже не может быть четным, отличается от них не на единицу, как в двухслойных обмотках, а на 2. Далее на рис. 6.5 представлен случай,

когда число пазов на полюс и фазу четное: $q = 4$; здесь частичные шаги неодинаковы: $y_1 < y_2$, хотя можно было бы сделать и наоборот; местное значение y_2' принято равным первому частичному шагу y_1, но могло бы быть равным и второму.

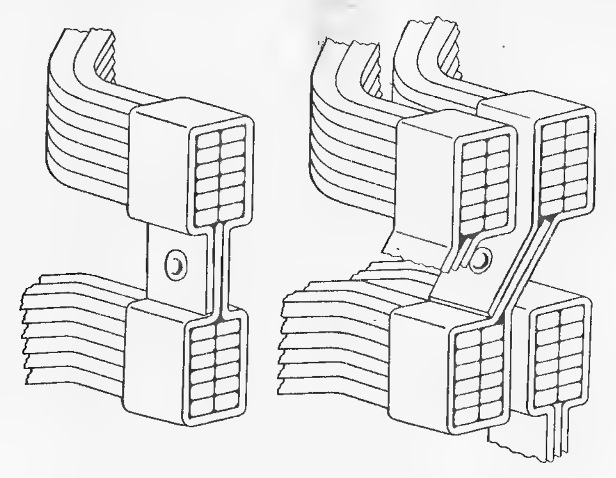


Рис. 6.3. Фасонные комутики для получения местного значения второго частичного шага

При четных числах q числа обходов в обеих частях фазы одинаковы и равны $q/2$; в случае надобности обе части могут быть соединены параллельно, поскольку они различаются только тем, что одна сдвинута на полюсное деление относительно другой. При

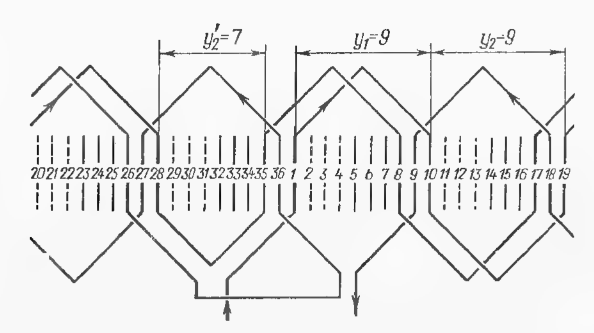


Рис. 6.4. Однослойная волновая обмотка с нечетным числом пазов на полюс и фазу

нечетных q числа обходов в частях фазы неодинаковы и потому применить их параллельное соединение невозможно; если же при больших числах пар полюсов потребуется иметь параллельные ветви, то они должны быть получены иными способами, рассматриваемыми в § 6.3.

Формы полусекций однослойной волновой обмотки еще более сложны, чем петлевой, из-за того, что лобовые части отогнуты в разные стороны; основная сложность, как и при петлевой обмотке, определяется тем, что каждая лобовая часть должна обойти соседнюю непосредственно после выхода из паза, что при большой высоте поперечного сечения стержней трудновыполнимо.

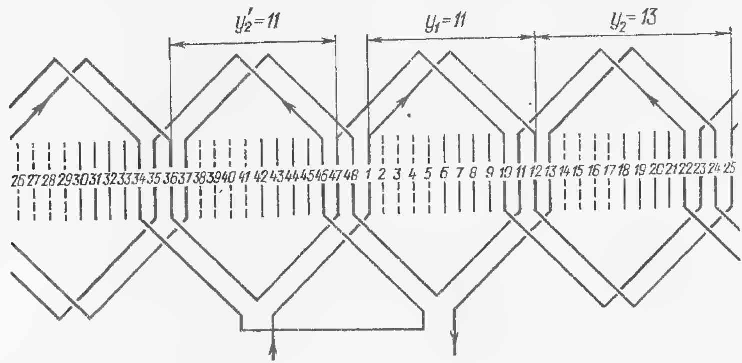


Рис. 6.5. Однослойная волновая обмотка с четным числом пазов на полюс и фазу

В заключение стоит упомянуть одну разновидность волновых обмоток, которая состоит в том, что одна половина обмотки делается прямоходовой, а другая — обратноходовой, как представлено на рис. 6.6. Это не отражается на электрических и электромагнитных свойствах обмотки и имеет одно достоинство — перемычка между половинами обмотки не пересекается с выводами данной фазы, что может быть удобным при ограниченности места

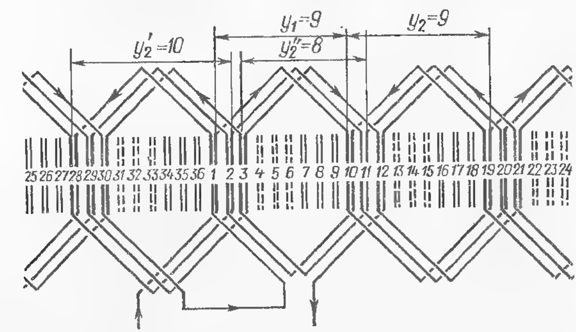


Рис. 6.6. Волновая обмотка смешанного типа

за лобовыми частями обмотки; зато недостатком является необходимость иметь два местных значения частичного шага: y_2' и y_2'', что увеличивает на два число вариантов стержней. Впрочем, при формовке лобовых частей на самой обматываемой части машины, как это делается в фазных роторах асинхронных двигателей, последнее обстоятельство не играет роли.

6.2. ОБМОТКИ ФАЗНЫХ РОТОРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В фазных роторах асинхронных двигателей средней и крупной мощности существует ряд условий, благоприятных для применения волновых обмоток. Поскольку обмотки роторов не соединяются с другими электрическими системами, их номинальное напряжение может быть произвольным в тех пределах, которые допускает расположение обмотки на вращающейся части машины; но номинальный ток ограничивается тем, что соединение обмотки с пусковой или регулирующей аппаратурой производится через скользящий контакт щеток на кольцах ротора. Поэтому предпочтительно применение обмоток без параллельных ветвей, тем более что при малых зазорах между статором и ротором, характерных для асинхронных машин, неточности сборки вызывали бы уравнительные токи между параллельными ветвями. Кроме того, обычно в роторе недостаточно места для размещения перемычек, что тоже препятствует применению петлевых обмоток.

Для фазных роторов асинхронных машин применяются обмотки и трехфазного, и двухфазного тока, последние главным образом при небольших мощностях; хотя они, как упоминалось, по своим электрическим и магнитным свойствам значительно уступают обмоткам трехфазного тока, но пусковая и регулирующая аппаратура при них получается более простой и дешевой.

Обмотка ротора находится в более стесненных условиях, чем обмотка статора; между тем она должна развивать мощность, лишь немногим уступающую мощности обмотки статора. Правда, в некоторых отношениях к ней предъявляются менее жесткие требования: от нее не требуется чистота индуктированной в ней ЭДС или создаваемой ею МДС и потому не налагаются никакие условия на систему ее обмоточных коэффициентов. Оба эти обстоятельства приводят к нецелесообразности укорочения шага, и потому обмотки роторов имеют, как правило, диаметральный шаг. По тем же причинам в обмотках роторов асинхронных машин всех видов применяются главным образом целые числа пазов на полюс и фазу.

Малые зазоры между статором и ротором, характерные для асинхронных двигателей, не благоприятствуют применению открытых пазов; поэтому в фазных роторах обмотка нормально укладывается либо в полузакрытые, либо в полностью закрытые пазы. С этой целью полусекции обмотки заготавливаются только с одной предварительно отформованной лобовой частью, вдвигаются в пазы сбоку и вторая лобовая часть формуется уже на месте, как показано на рис. 6.7.

В § 6.1 было отмечено, что две половины каждой фазы волновой обмотки соединяются последовательно перемычками между лобовыми частями полусекций одного и того же слоя; указанный выше недостаток места в роторах заставляет выполнять это со-

единение в *нижнем* слое обмотки, утапливая перемычки под лобовыми частями. Зачастую, особенно в двигателях умеренных мощностей, перемычка изготовляется заодно с теми полусекциями, которые она должна соединять, в виде П-образного элемента; в этих случаях ее принято называть *поперечкой*. Ее лобовые части делаются с минимальным вылетом, достаточным лишь для того, чтобы обойти лобовые части соседних полусекций по возможности сразу же по выходе из пазов, как представлено на рис. 6.8, и укладка нижнего слоя обмотки начинается с размещения поперечек всех трех фаз.

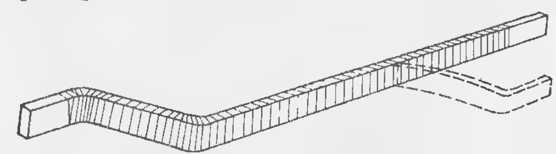


Рис. 6.7. Полусекция волновой обмотки фазного ротора асинхронного двигателя

Поскольку обмотка находится на вращающейся части машины, то нежелательно, чтобы в самой ее конструкции были заложены элементы неуравновешенности; по этой причине как перемычки, так и начала и концы фаз обычно распределяются равномерно по окружности ротора, а не сосредоточенно, как в обмотках статора.

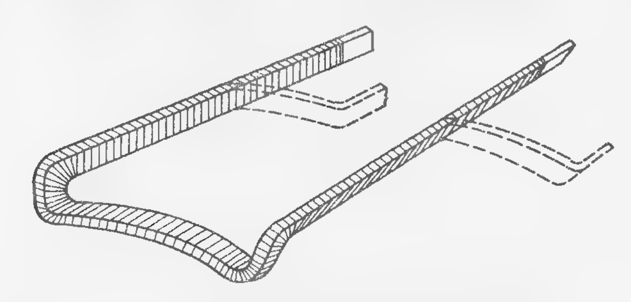


Рис. 6.8. Поперечка роторной обмотки

Это всегда можно сделать, если число полюсов не кратно числу фаз m; но если такая кратность имеется, то под углами, равными $1/m$ окружности, всегда будут находиться пазы одной и той же фазы, и потому конструктивное уравновешивание возможно только приближенно — тем лучше, чем больше число пар полюсов, но никогда не полностью. Попутно следует отметить, что по этой причине обмотка двухфазного тока ни при каком числе пар полюсов не может быть конструктивно уравновешена, так как число полюсов всегда кратно числу ее фаз.

Помимо перемычек между половинами каждой фазы в обмотках двухфазного тока требуется еще перемычка между фазами

с выводом к общему контактному кольцу, а в обмотках трехфазного тока — для сопряжения фаз в звезду, тоже вносящая конструктивную неуравновешенность, если только она не выполнена в виде кольца, надетого на вал. Сопряжение фаз в треугольник в обмотках роторов применяется редко, главным образом в машинах больших мощностей, в которых при сопряжении фаз в звезду напряжение между контактными кольцами при пуске становится слишком высоким; но в этом случае требуются уже три перемычки, которые можно расположить симметрично, если число пар полюсов не кратно трем. Отводы к контактным кольцам и к перемычкам для того или иного сопряжения фаз приходятся рядом с участками, где второй частичный шаг имеет местное значение y_2'.

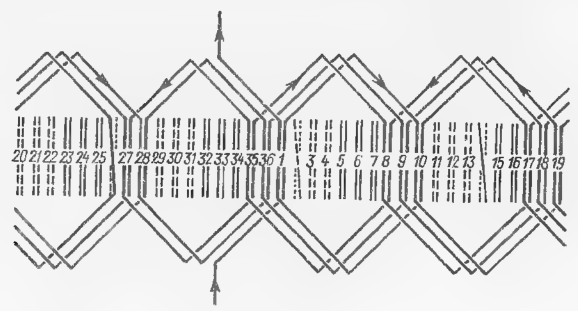


Рис. 6.9. Обмотка с переходом внутри паза

Как правило, в пазу находятся только два стержня — по одному в каждом слое; однако в более крупных машинах, когда поперечное сечение проводников становится настолько большим, что их отгибание после укладки в пазы затруднительно, применяется подразделение сечения на две части, укладываемые рядом и электрически соединенные в хомутиках.

Иногда, главным образом при больших числах пар полюсов, применяется такое видоизменение волновой обмотки: последний стержень последнего обхода первой половины каждой фазы, который должен находиться в нижнем слое, не выходит в лобовые части вместе с последними стержнями предыдущих обходов, где они имеют местное значение второго частичного шага y_2', но переходит внутри паза в нижний слой и является одновременно первым стержнем первого обхода второй половины фазы, как если бы начало этой половины находилось на стороне машины, противоположной началу первой половины. Сообразно этому во второй половине фазы лобовые части с местными значениями шага y_2' и конец этой половины, являющийся и концом фазы, находятся по другую сторону машины, нежели начало фазы и лобовые части с местным значением шага y_2' первой половины. Пример схемы такой обмотки дан на рис. 6.9.

Таким образом, пожертвовав одним стержнем в каждой фазе, можно устранить перемычки между половинами фаз, что освобождает от заботы по их размещению и укреплению; если число пар полюсов не кратно числу фаз, то такое устройство обмотки не нарушает ее конструктивной уравновешенности. Как именно осуществить переход стержня внутри паза из одного слоя в другой и как заполнить образовавшиеся промежутки в лобовых частях — это вопрос конструктивного оформления обмотки. Понятно, что влияние удаления одного стержня на электрические и электромагнитные свойства обмотки тем меньше, чем больше общее число стержней; поэтому не следует рекомендовать применение данного видоизменения при малых числах пар полюсов.

Обмотки такого вида следовало бы причислить к обмоткам с дробными числами пазов на полюс и фазу, потому что отнести их полностью к обмоткам с целыми числами пазов нельзя; однако они не обладают некоторыми существенными признаками обмоток с дробными числами пазов, так, например, они сохраняют способность иметь диаметральный шаг, который при дробных числах пазов невозможен.

Что касается настоящих обмоток с дробными числами пазов на полюс и фазу, то в роторах асинхронных двигателей они применяются редко, и то лишь с числом пазов вида

$$q = b + 1/2. \qquad (6.3)$$

Такие обмотки могут выполняться двумя способами. Согласно одному из них обмотка делает $b + 1$ прямых обходов, а затем b обратных; этот способ может быть применен при любом числе пар полюсов. Второй способ, в основном пригодный для обмоток с четными числами пар полюсов, состоит в том, что в обеих частях фазы к b полным обходам добавляется еще по $p/2$ полных шагов y; если же p нечетно, то в одной части будет добавлено на один шаг больше, чем в другой.

Как и при целых числах пазов, полный шаг численно равен числу пазов на пару полюсов, т. е.

$$y = Z/p; \qquad (6.4)$$

он не может быть диаметральным, потому что число пазов на полюс

$$Q = 3b + 3/2 \qquad (6.5)$$

тоже дробно. Поэтому частичным шагам y_1 и y_2 приходится придавать попеременно те целые значения, между которыми заключено число пазов на полюс, т. е. $3q + 1/2$ и $3q - 1/2$, так что они различаются на единицу; свойства обмотки не зависят от того, который из них принят бо́льшим. Обмотки этого вида, как и при целых числах пазов, имеют в конце каждого обхода местное значение второго частичного шага y_2'. Отсюда следует, что если принять $y_1 > y_2$, то местное значение y_2' будет на единицу меньшим,

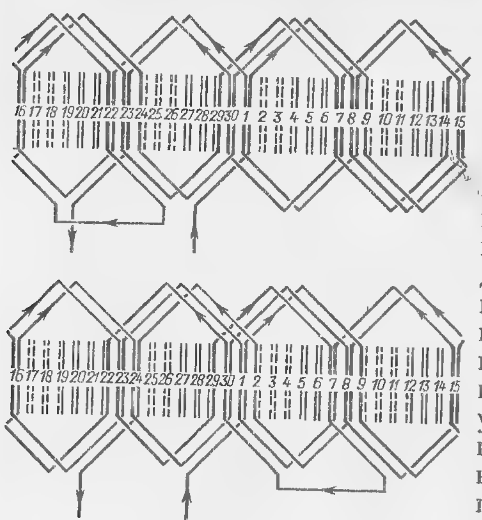


Рис. 6.10. Два варианта волновой обмотки с $q = 2^1/_2$

чем в противном случае, что не отражается на свойствах обмотки. Эти последние у обеих разновидностей неодинаковы. Для иллюстрации на рис. 6.10 сопоставлены две четырехполюсные обмотки с числом пазов на полюс и фазу $q = 2\,^1/_2$ и одинаковыми частичными шагами, выполненные двумя вышеуказанными способами. Из него видно, что распределение сторон секций обмоток по полюсным делениям различно; если, как это делалось в главе пятой, рассматривать только один из слоев, что вполне достаточно для выяснения свойств обмотки, то окажется, что в обмотке, выполненной первым способом, стороны секций каждой фазы распределены по полюсным делениям в порядке

$$b,\ b + 1,\ b,\ b + 1,$$

что соответствует числу пазов на полюс и фазу $q = b + 1/2$, и обмотка не является единичной, но представляет двукратное повторение двухполюсной обмотки с этим числом пазов. У обмотки, выполненной вторым способом, распределение сторон секций имеет вид

$$b,\ b + 1,\ b + 1,\ b,$$

что соответствует единичной обмотке с $q = b + 2/4$.

Первый способ имеет то преимущество, что коэффициент распределения для основной волны у него выше, хотя и ненамного: 0,9514 против 0,9462; зато для ЭДС, индуктируемой двухполюсным полем, он равен нулю против 0,1000. Поскольку единичная обмотка имеет только одну пару полюсов, первым способом могут быть выполнены обмотки на любое число пар полюсов, и для всех них будет оставаться действительным порядок распределения сторон секций — поочередно то b, то $b + 1$.

Характерным признаком обмоток с числами пазов на полюс и фазу вида $q = b + 1/2$ является распределение сторон секций в пазах: каждой данной фазе принадлежат стороны секций в верхнем и нижнем слоях в b рядом лежащих пазах, а по одну или другую сторону от них данной фазе принадлежит еще одна сторона секции либо только в верхнем, либо только в нижнем слое, а остающееся место занято стороной секции одной из двух прочих фаз; например, при $q = 2^1/_2$

2 1 1 1 3 3 2 2 2 1 1 3

2 1 1 3 3 3 2 2 1 1 1 3 и т. д.

По второму способу при небольших числах пар полюсов обмотки получаются беспрепятственно, но начиная с $p = 5$ возникают затруднения — после завершения укладки первой части каждой фазы не удается выполнить вторую без дополнительных местных значений второго частичного шага и лишних перемычек.

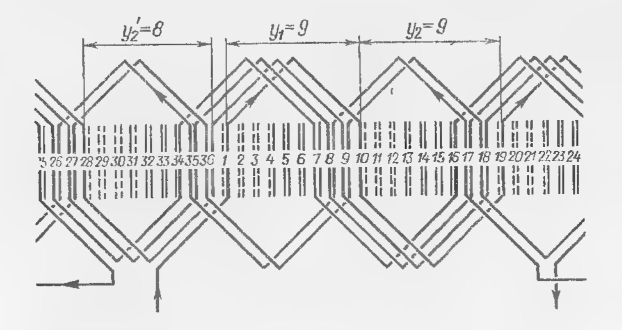


Рис. 6.11. Обмотка с неодинаковыми числами прямых и обратных обходов

В этом проявляется различие петлевых и волновых обмоток: распределить пазы поровну и одинаковым образом между всеми фазами в обоих типах не представляет затруднений, например, применением построения таблицы, описанного в конце § 5.3, или иных практикуемых приемов; однако в то время как в петлевой обмотке местоположение каждой следующей секции данной фазы по отношению к предыдущей ничем не ограничивается, в волновой обмотке оно не может быть произвольным и определяется вторым частичным шагом y_2. Придавать ему различные значения (помимо нормального местного значения y_2') было бы крайне неудобно, и потому применение второго способа не может быть рекомендовано.

Неодинаковые числа обходов в двух частях каждой фазы применяются иногда и при целых числах пазов на полюс и фазу, особенно в обмотках роторов быстроходных двигателей. На рис. 6.11 дана четырехполюсная обмотка с $q = 3$, у которой в одной части содержится $q + 1 = 4$ обхода, а в другой $q - 1 = 2$ обхода, в результате чего несколько укорачивается перемычка между обходами. Такое изменение обмотки незначительно отражается на ее свойствах — оно равноценно укорочению шага на одно зубцовое деление, чему при больших числах пазов на полюс и фазу соответствует значение коэффициента укорочения, мало отличающееся

от единицы, хотя фактический шаг обмотки y_1 остается диаметральным.

Параллельные ветви в обмотках роторов асинхронных машин практически не применяются несмотря на то, что при целых числах пазов на полюс и фазу обе половины каждой фазы электрически вполне одинаковы и уравнительных токов между ними быть не должно. Это объясняется тем, что нужно было бы соединять между собой начала и концы частей, лежащие в разных слоях, что неудобно; поэтому, если желательно понизить напряжение между контактными кольцами, то применяется упомянутое ранее сопряжение фаз в треугольник.

Стремление ограничить ток обмотки ротора и тем самым упростить пусковую аппаратуру в двигателях небольшой мощности приводит к применению многовитковых секций; в этих условиях волновая обмотка теряет смысл и уступает место петлевой. В более старых исполнениях двигателей с фазными роторами применялись концентрические обмотки с расположением лобовых частей в два яруса, мало отличающиеся по исполнению от таких же статорных обмоток. Секции наматывались большей частью из изолированного проводника круглого сечения и укладывались в полузакрытые пазы через отверстие паза или выполнялись способом прошивания на самом роторе. В более современных двигателях встречаются двухслойные обмотки фазных роторов, намотанные из изолированного проводника прямоугольного сечения, в общем весьма похожие на статорные двухслойные обмотки; сечения проводников располагаются в пазу плашмя, и секции укладываются в открытые пазы, закрываемые клиньями. Отличие от статорных обмоток состоит лишь в том, что пазы делаются очень узкими для того, чтобы при малых зазорах асинхронных машин не создавать на поверхности статора чрезмерные добавочные потери от пульсации индукции. Следует, однако, отметить, что с течением времени нижний предел мощности, на которую выполняются двигатели с фазными роторами, неизменно становится все выше, так что подобные обмотки постепенно теряют свое значение.

6.3. ВОЛНОВЫЕ ОБМОТКИ СТАТОРОВ С ЦЕЛЫМИ ЧИСЛАМИ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ

Помимо фазных роторов асинхронных машин волновые обмотки трехфазного тока применяются в статорах крупных многополюсных синхронных машин, главным образом гидрогенераторов, причем в виде не только двухслойных, но изредка и однослойных, чего в роторах асинхронных двигателей не встречается.

При целых числах пазов на полюс и фазу, обычно не выше 5—6, эти обмотки имеют, как и роторные, полный шаг $y = 6q$; но в отличие от последних их частичные шаги неодинаковы: $y_1 \neq y_2$. Любой из них может быть принят укороченным с соответствующим удлинением другого; электрические и электромагнитные свойства обмоток от этого не зависят.

В случае если укорачивается первый частичный шаг y_1, то вылет лобовых частей со стороны выводных концов получается бо̀льшим, чем с противоположной стороны. Если обмотка не имеет параллельных ветвей, то помимо трех начал и трех концов фаз, выводимых наружу, внутри обмотки существуют только три относительно короткие, в одно полюсное деление, перемычки между обходами в прямом и обратном направлениях. Однако если фазы обмотки должны иметь параллельные ветви, то может оказаться целесообразным укорачивать второй частичный шаг y_2 с тем, чтобы за счет уменьшения вылета со стороны выводных концов получить больше места для размещения соединений. Укорочение того или иного частичного шага может определяться и соображениями общей компоновки вентиляционного тракта машины. При рассмотрении двухслойных обмоток с целыми числами пазов на полюс и фазу представляется удобным считать частичные шаги обмотки y_1 и y_2 равными и диаметральными, хотя в действительности этого никогда не бывает.

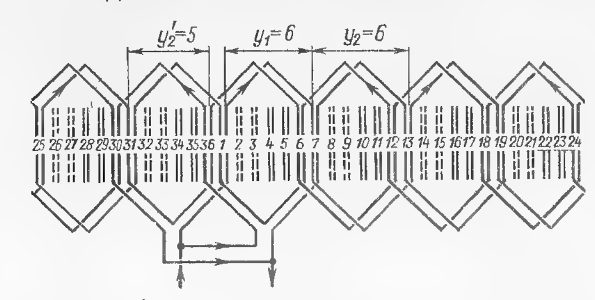


Рис. 6.12. Параллельное соединение половин волновой обмотки

В отношении роторных волновых обмоток было отмечено, что применение параллельных ветвей в них хотя и возможно, но связано с такими неудобствами, что его обычно избегают. Это, однако, не распространяется на статорные волновые обмотки, находящиеся в менее стесненных условиях.

При целых числах пазов на полюс и фазу каждая фаза обмотки состоит из двух одинаковых частей — с прямыми и обратными обходами; вне зависимости от укорочения шага обе эти части одинаковым образом расположены во внешнем магнитном поле, только со сдвигом в одно полюсное деление, и потому в электрическом и электромагнитном отношениях они одинаковы, что позволяет соединять их параллельно без возникновения уравнительных токов. Для этого в каждой фазе нужно иметь две перемычки, соединяющие обе части параллельно; их длина в среднем соответствует полюсному делению, но одна несколько короче другой, как на рис. 6.12 (первый — основной способ). В каждой ветви

сохраняется по одному месту, где второй частичный шаг принимает местное значение y_2'. Однако если в индукторе применено смещение полюсов или их групп, как это было упомянуто в § 3.1, то образованные таким способом параллельные ветви могут оказаться в несколько неодинаковых условиях по отношению к внешнему магнитному полю, в результате чего между ними возникнут некоторые уравнительные токи.

При четных числах пар полюсов p и пазов на полюс и фазу q возможен второй способ получения двух параллельных ветвей, свободный от недостатка предыдущего (рис. 6.13); на расстоянии половины окружности машины от начал и концов прямых и обратных обходов каждой фазы производится скрутка лобовых частей, в результате которой первый обход переходит во второй, третий — в четвертый и т. д. После этого в начале

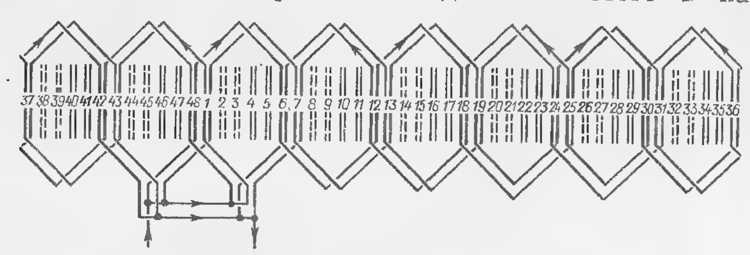


Рис. 6.13. Параллельное соединение при помощи скрутки лобовых частей

каждой половины фазы можно соединить параллельно первый обход со вторым, а в конце этой половины — предпоследний обход с последним. В образовавшихся таким образом параллельных ветвях все обходы представлены в равной мере:

Половина окружности:		Первая	Вторая
Ветвь первая — обходы:	Начало —	первый	— второй
		третий	— четвертый
. . . .			
		предпоследний	— последний — конец
Ветвь вторая — обходы:	Начало —	второй	— первый
		четвертый	— третий
. . . .			
		последний	— предпоследний — конец

Скрутка выполняется посредством фигурных хомутиков, соединяющих стороны секций, подобных показанным на рис. 6.14; конечно, это связано с определенными неудобствами, но в статорных обмотках они более приемлемы, чем в роторных.

Если число пар полюсов имеет первоначальные множители, то параллельные ветви в числе, равном любому из этих множителей или их произведению, могут быть получены третьим способом (рис. 6.15). Каждый обход в прямом направлении прерывается после того, как им обойдена $1/a$ часть окружности машины, и соединяется перемычкой, имеющей длину, соответствующую полюсному делению, с обходом в обратном направлении. Этот последний, в свою очередь, прерывается, и перемычкой делается возврат к очередному обходу в прямом направлении и т. д., пока не будут охвачены все обходы. Очевидно, что число перемычек в месте прекращения обходов в прямом направлении равно числу пазов на полюс и фазу q, а в месте прекращения обходов в обратном направлении — ему же, уменьшенному на единицу, а всего получается $2q - 1$ перемычек в каждой фазе на одну параллельную ветвь. Местные значения второго частичного шага y_2' здесь не применяются, потому что их роль воспринимают перемычки. Поскольку каждая параллельная ветвь занимает только часть окружности, между ними могут возникать

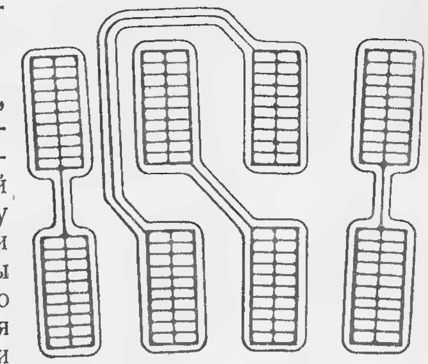


Рис. 6.14. Хомутики для скрутки лобовых частей

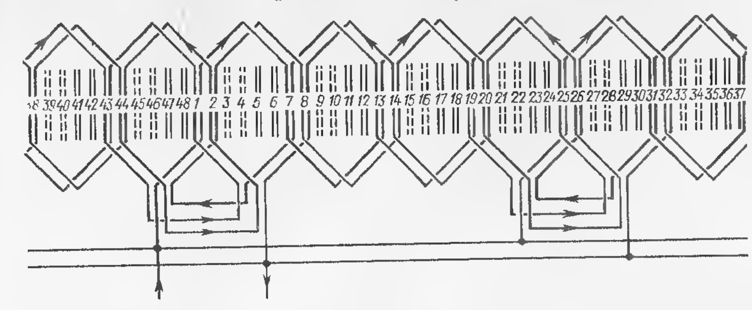


Рис. 6.15. Параллельное соединение при помощи обратных перемычек

уравнительные токи из-за неправильностей сборки машины. Эти токи можно в значительной степени ограничить, если число пар полюсов четно и имеет еще и другие первоначальные множители; тогда каждая ветвь образуется последовательным соединением двух частей, полученных по-предыдущему и лежащих диаметрально, следовательно, число параллельных ветвей может быть не больше произведения всех первоначальных множителей, кроме 2.

Волновая обмотка в общем предназначена для малых чисел параллельных ветвей, иначе она теряет смысл и более целесообразной оказывается петлевая обмотка. При укорочении шага вылеты лобовых частей по обе стороны машины и длина витка в петлевой обмотке уменьшаются, между тем как в волновой укорочение шага практически настолько же увеличивает вылет с одной стороны, насколько уменьшает с другой, так что длина витка остается неизменной. Для сравнения обмоток обоих видов на рис. 6.16

представлены отрезки схем двенадцатиполюсных обмоток с одним и тем же числом пазов на полюс и фазу $q = 2$ и одинаковым числом параллельных ветвей $a = 3$; по причине нечетности последнего волновая обмотка должна быть выполнена третьим из приведенных выше способов.

В петлевой обмотке число перемычек между группами секций зависит не от числа пазов на полюс и фазу, а от числа параллельных ветвей; оно убывает с увеличением последнего. Действительно, если бы обмотка не имела параллельных ветвей, то число перемычек в каждой фазе было бы равно $2p - 1$; при a параллельных ветвях в каждой из них будет $2p/a - 1$ перемычек, а если число

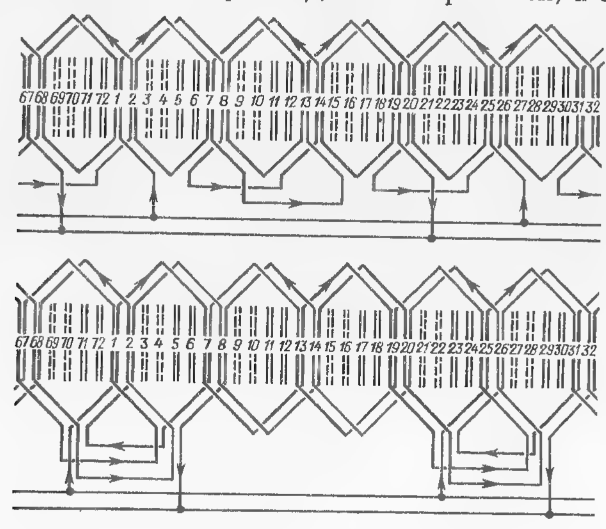


Рис. 6.16. Сопоставление петлевой и волновой обмоток с параллельными ветвями

параллельных ветвей станет равным числу полюсов, т. е. $a = 2p$, то перемычки исчезнут вовсе и останутся только сборные шины, по паре на каждую фазу, непосредственно к которым присоединены все параллельные ветви. В данном случае в каждой параллельной ветви имеются три перемычки, а во всей фазе — девять.

Если бы в волновой обмотке не было параллельных ветвей, то в каждой фазе было бы только по одной перемычке, соединяющей прямые обходы с обратными; но если параллельные ветви устроены по третьему из рассмотренных способов, то в каждой фазе, как уже было указано, на каждую ветвь приходится $2q - 1$ перемычек. Их число возрастает с увеличением числа ветвей и в пределе, при $a = 2p$, достигает $2p\,(2q - 1)$. В данном примере в каждой ветви волновой обмотки столько же перемычек, как и в петлевой, т. е. три, а в фазе — девять; но достаточно увеличить число пазов на полюс и фазу, чтобы это равенство нарушилось — в петлевой обмотке по-прежнему останется девять перемычек в фазе, а в волновой оно соответственно возрастет.

Если бы в качестве критерия для выбора вида обмотки было достаточно число перемычек, необходимое для выполнения обмотки с заданным числом параллельных ветвей, то тогда условие равенства чисел перемычек в обмотках обоих типов

$$2p - a = a\,(2q - 1) \qquad (6.6)$$

приводило бы к простому соотношению: если $p > aq$, то предпочтение надо отдать волновой обмотке, в противном же случае — петлевой.

Для точного решения вопроса о преимуществе обмотки того или иного вида необходимо знать много конструктивных данных конкретной машины; однако не представляет особых затруднений значительно приблизиться к нему путем следующих допущений.

Во-первых, можно считать, что расход меди и изоляционных материалов пропорционален общей длине обмотки вместе со всеми перемычками; на самом деле, поперечное сечение перемычек может быть иным, нежели стержней обмотки, а изоляция их и лобовых частей обмотки — отличаться от изоляции пазовых частей, но это не внесет очень существенной ошибки.

Во-вторых, следует принять, что отдельные элементы конструкции обмоток обоих видов одинаковы; это даст возможность считать, что каждая секция состоит из двух участков постоянной длины, в которые входят как прямолинейные части внутри пазов и при выходе из них, так и такие элементы, как головки лобовых частей, и четырех наклонных криволинейных участков, общая длина которых пропорциональна сумме шагов обмотки по ту и другую стороны машины.

В-третьих, нужно положить, что длина всех перемычек в обмотках обоих типов одинакова и равна полюсному делению τ; это достаточно справедливо для петлевой обмотки и в среднем приемлемо для волновой, перемычки которой частично короче, а частично длиннее полюсного деления.

Наконец, нужно учесть, что в петлевой обмотке при наличии параллельных ветвей должны существовать сборные шины, по паре на каждую фазу, которые нужны волновой обмотке только при третьем способе образования параллельных ветвей. Эти шины могут иметь форму как замкнутых колец с сечением, достаточным для проведения суммы токов всех параллельных ветвей, так и незамкнутых дуг с переменным сечением, возрастающим по мере приближения к выводам.

Таким образом, решение задачи о преимуществах того или иного типа обмотки в общем виде с точки зрения расхода материалов вряд ли целесообразно; она должна решаться применительно к каждому конкретному случаю с учетом чисто конструктивных факторов. При этом во многих случаях данный вопрос отходит

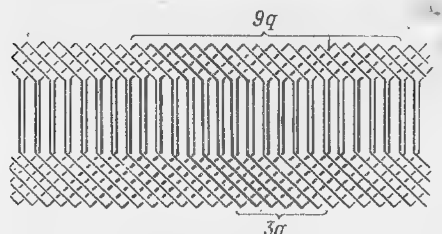


Рис. 6.17. Укладка стержней на стыке секторов статора

на задний план, уступая место соображениям, вытекающим из свойств обмоток.

Одним из недостатков петлевых обмоток является то, что перемычки между группами ее секций образуют в каждой фазе почти непрерывный виток вокруг вала машины. При симметричной нагрузке фаз это не играет существенной роли, так как намагничивания, создаваемые перемычками всех трех фаз, в сумме практически уничтожаются; но при несимметричной нагрузке возникает неуравновешенность, которая может вызвать переменную ЭДС в вале и порождаемые последней подшипниковые токи. Волновые обмотки с целыми числами пазов на полюс и фазу полностью лишены этого недостатка, поскольку обходы обмотки в прямом и обратном направлениях делают обмотку бифилярной по отношению к валу.

Статоры крупных многополюсных машин, главным образом гидрогенераторов, обычно делаются разъемными на 2, 3, 4 или 6 частей; при этом обмотка у мест разъема на заводе-изготовителе не укладывается. В нижнем слое у каждого разъема следует оставить без обмотки $3q$ пазов, потому что столько стержней нижнего слоя пересекает своими лобовыми частями место разъема; в верхнем слое нужно оставить незаполненными втрое больше — $9q$ мест для стержней, которые своими лобовыми частями перекрывают лобовые части неукладываемых стержней нижнего слоя, как это можно видеть на рис. 6.17, на котором стороны секций, могущие быть уложенными на заводе-изготовителе, показаны тонкими линиями, а подлежащие укладке на месте установки — жирными.

В разъемных статорах обычно стараются расположить выводы так, чтобы они все находились на одной и той же части статора, для чего нужно, чтобы на долю одной части приходилось не менее трех полюсных делений; это условие, как правило, удовлетворяется с избытком. Если обмотка либо вовсе не имеет параллельных ветвей, либо имеет две параллельные ветви, образованные по первому или второму способам, или четыре параллельные ветви, образованные сочетанием первого и второго способов, то все перемычки между прямыми и обратными обходами могут быть сосредоточены вместе с выводами на этом промежутке, а места всех разъемов полностью освобождены от каких бы то ни было соединений, кроме непосредственных соединений стержней в головках секций. Тогда обмотка всех частей, кроме одной, может быть выполнена по одному и тому же чертежу.

В последнее время стало практиковаться выполнение сердечников статоров наиболее крупных гидрогенераторов без стыков; сборка активной стали и наложение обмотки производятся при этом на месте установки. Хотя это осложняет изготовление машины, перенося значительную его часть на место ее установки, но преимущества монолитного сердечника окупают все неудобства. В таком случае отпадают все затруднения с размещением перемычек, которое может быть выполнено наиболее рациональным образом.

Волновые обмотки статоров могут быть не только двухслойными, но и однослойными, поскольку при четных числах пазов на полюс и фазу однослойная обмотка может быть получена из двухслойной удвоением числа ее пазов. Однослойная волновая обмотка сохраняет свойства однослойных равносекционных обмоток, в том числе и отрицательные; в частности, оба ее частичных шага должны быть непременно нечетными, а полный шаг — четным. Как и всякая волновая обмотка, она имеет после каждого полного обхода местное значение второго частичного шага, однако здесь оно равно

$$y_2' = y_2 \pm 2. \qquad (6.7)$$

6.4. ВОЛНОВЫЕ ОБМОТКИ СТАТОРОВ С ДРОБНЫМИ ЧИСЛАМИ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ

Способы получения двухслойных петлевых обмоток с дробными числами пазов на полюс и фазу из обмоток с целыми числами, изложенные в § 5.2, показывают, что эти обмотки беспрепятственно могут быть выполнены при всех числах пазов, содержащихся в приложениях 13 и 14. Более того, там же было показано, что при любом значении числителя c, удовлетворяющем неравенству $1 < c < d - 1$, обмотка может быть выполнена в нескольких вариантах распределения сторон секций по полюсным делениям с различными электрическими и электромагнитными свойствами, среди которых можно выбрать наиболее подходящий к требованиям каждого данного случая. При этом не было оснований считать какие-либо категории дробных чисел пазов нежелательными для применения; единственно лишь отмечалось преимущество обмоток с нечетными знаменателями d, состоящее в том, что для них коэффициенты распределения всех четных порядков, как целых, так и дробных, тождественно равны нулю.

Что касается волновых обмоток с дробными числами пазов на полюс и фазу, то для них следует различать принципиальную возможность выполнения и его практическое удобство. Размещение сторон секций одного какого-либо слоя всегда может быть выполнено построением таблицы, подобной описанной в § 5.3, а места для сторон секций другого слоя будут обеспечены тем, что первый частичный шаг y_1 всех секций одинаков, как и при петлевой обмотке. Но здесь этого мало: нужно, чтобы всюду (или почти всюду, за немногими исключениями, притом распределенными регулярно) выполнялся и второй частичный шаг y_2, так как в про-

тивном случае потребуется не только применение фигурных хомутиков, подобных представленным на рис. 6.14, вообще нежелательное, но и дополнительных перемычек, зачастую значительно более длинных, чем необходимые для соединения прямых и обратных обходов, и в большем числе.

По этой причине полностью пригодными для применения являются не только не все варианты распределения сторон секций по полюсным делениям при каждом данном дробном числе пазов на полюс и фазу q, но и не все числа пазов. При этом, как будет показано ниже, комплект таких чисел, зависящий определенным образом от состава знаменателя дроби d, не возрастает с увеличением последнего, при котором все большее число сочетаний числителя c со знаменателем d становится неудобным для выполнения.

Уже при рассмотрении волновых обмоток роторов асинхронных двигателей с дробными числами пазов вида $q = b + 1/2$ было выяснено, что они могут быть выполнены в основном двумя различными способами — когда все дополнительные шаги сверх b обходов либо сосредоточены в одной части обмотки, например с прямыми обходами, либо распределены между двумя частями обмотки поровну или непоровну. Нечто подобное имеет место и при $d > 2$; однако увеличение знаменателя сверх $d = 2$ дает совершенно новую возможность — устранить применение местного значения второго частичного шага y_2'.

Каждый обход волновой обмотки содержит p полных шагов y, причем при нечетных значениях знаменателя d имеет место равенство $p = d$, а при четных $p = d/2$. Если в результате одного обхода получится, что

$$py \mp 1 = Z, \tag{6.8}$$

то конец обхода окажется в одном из пазов, соседних с тем, от которого он был начат. Это значит, что следующий обход может быть начат непрерывным продолжением обходов без применения местного значения второго частичного шага y_2'. Знак минус здесь соответствует прямоходовым обмоткам, поскольку после одного обхода обмотка приходит в паз, лежащий за тем, с которого начат обход, а знак плюс — обратноходовым обмоткам. Возможность исключения местного значения y_2' представляет весьма ценное свойство волновых обмоток с дробными числами пазов на полюс и фазу, так как позволяет избежать применения ненормальных деталей обмотки, т. е. сократить их ассортимент; поэтому она заслуживает более подробного рассмотрения.

В § 5.1 было установлено, что выполнимость дробного числа пазов на полюс и фазу не зависит от целой части b смешанной дроби; поэтому для упрощения дальнейших рассуждений удобно положить $b = 0$. Вместе с этим должно измениться и значение полного шага, которое станет условно равным

$$y' = y - 6b, \tag{6.9}$$

поскольку на каждом полюсном делении в каждой фазе отнято b зубцовых делений; понятно, что y' не может быть ни меньше единицы, ни больше пяти, так как значения 0 и 6 соответствуют целым числам пазов на полюс и фазу. Изменится и общее число пазов обмотки, которое станет равным

$$Z' = Z - 6pb; \tag{6.10}$$

но условие (6.8) сохранит свою форму:

$$py' \mp 1 = Z'.$$

Таким образом,

$$py' \mp 1 = 6pq = 6p\frac{c}{d},$$

откуда

$$c = \frac{y'd \mp d/p}{6}. \tag{6.11}$$

Если d нечетно, то $p = d$, и потому

$$c = \frac{y'd \mp 1}{6}; \tag{6.12}$$

а так как значения c должны быть целыми, то это равенство возможно в двух случаях: когда $y' = 1$, следовательно,

$$c = \frac{d \mp 1}{6}, \tag{А}$$

или когда $y' = 5$, откуда

$$c = \frac{5d \mp 1}{6}. \tag{Б}$$

Если d четно, то $p = d/2$, и потому

$$c = \frac{y'd \mp 2}{6}; \tag{6.13}$$

это равенство становится возможным при $y' = 2$, и тогда

$$c = \frac{2d \mp 2}{6} = \frac{d \mp 1}{3} \tag{В}$$

или при $y' = 4$

$$c = \frac{4d \mp 2}{6} = \frac{2d \mp 1}{3}. \tag{Г}$$

Две последние формулы дают только нечетные значения c, иными словами, им соответствуют единичные обмотки; ни при каких значениях дроби, могущих быть сокращенными, т. е. дать производные, обмотка не может после целого обхода попасть в паз, соседний с тем, из которого этот обход был начат.

Если d четно, то равенство (6.11) может удовлетворяться также при значениях шага $y' = 1$, и тогда

$$c = \frac{d \mp 2}{6}, \tag{Д}$$

и при $y' = 5$, что дает

$$c = \frac{5d \mp 2}{6}. \tag{Е}$$

Можно упомянуть еще случай, когда после одного обхода обмотка приходит в паз, отстоящий на два зубцовых деления в ту или иную сторону от того, с которого начат обход, для чего необходимо условие

$$py = Z \pm 2. \tag{6.14}$$

Рассуждая по-предыдущему, можно установить, что оно выполняется при значениях

$$c = \frac{y'd \mp 2d/p}{6}. \tag{6.15}$$

Обмотка, удовлетворяющая такому условию, при четном значении общего числа пазов Z распадается на две вполне одинаковые обмотки, сдвинутые одна относительно другой на одно зубцовое деление; их можно соединить последовательно, но не параллельно. При нечетном значении Z получается двухходовая однократнозамкнутая обмотка, которую можно разделить только на три части одинакового состава.

Формула (6.15) допускает шесть различных случаев, однако они усложняют дальнейшие построения и потому более подробно здесь не рассматриваются.

В приложении 18 приведены сочетания числителей c и знаменателей d, допускающие выполнение обмоток без местного значения второго частичного шага y'_2. Они отмечены буквенными обозначениями тех формул, по которым получены, с добавлением знаков: минус — для прямоходовых обмоток и плюс — для обратноходовых. Из таблицы этого приложения видно, что при всех нечетных значениях d имеется по два сочетания, дающие после обхода разность ∓ 1, а при четных значениях d, начиная с $d = 10$, имеется по четыре таких сочетания. Таблица доведена до $d = 32$; в этом пределе ни разу не встречаются значения $c = 20$ и 25, поэтому соответствующие им строки таблицы не содержат ни одного сочетания c и d.

При нечетных значениях знаменателя d число пар полюсов единичной обмотки равно d, и потому общее число пазов

$$Z = 3 \cdot 2pq = 6d\,(b + c/d) = 6\,(bd + c); \tag{6.16}$$

при любом c это всегда представляет четное число, кратное трем. Если c удовлетворяет формулам (А) или (Б), т. е. если после одного обхода обмотка приходит в паз, соседний с тем, от которого был начат обход, как это бывает в простых волновых обмотках якорей коллекторных машин, то для того чтобы превратить обмотку в трехфазную, достаточно ее разрезать в шести равноотстоящих точках окружности. Все шесть получившихся при этом частей вполне одинаковы по составу, и каждая из них одинаковым образом охватывает всю окружность; две противолежащие части, соединенные последовательно перемычкой длины, соответствующей половине окружности, образуют одну фазу. Их можно соединить и параллельно, для чего потребуются две перемычки меньшей длины — примерно на $1^2/_3$ полюсного деления; при этом нет основания ожидать возникновения серьезных уравнительных токов, и тем в меньшей степени, чем больше целая часть дробного числа q и чем ближе к единице или к $d - 1$ числитель c.

Однако отнюдь не обязательно, чтобы точки разреза обмотки были равномерно распределены по окружности; важно лишь, чтобы они располагались в вершинах двух равносторонних треугольников, произвольным образом повернутых один относительно другого. При равномерном распределении точек разреза в каждой части обмотки содержится b полных обходов и еще c полных шагов; если же, разрезав обмотку на три равные части, добавить к каждой из них по одному и тому же числу полных шагов, отняв их от соседних частей, и только после этого выполнить три других разреза, то последние окажутся сдвинутыми относительно первых трех, но не произвольным образом, а вполне закономерно. Так, например, можно оставить в уменьшаемых частях только b полных обходов, переместив все дополнительные шаги в увеличиваемые части.

При четных значениях знаменателя d число пар полюсов единичной обмотки равно $d/2$ и общее число пазов

$$Z = 3 \cdot 2pq = 3d\,(b + c/d) = 3bd + 3c; \tag{6.17}$$

первое слагаемое здесь всегда четно, а второе четно или нечетно вместе с c и этим определяет четность или нечетность Z. Следствием нечетности является невозможность разрезать обмотку на шесть равных частей, и потому с ней надо поступать так, как в случае смещения точек разреза при четном значении d.

На рис. 6.18 представлена схема четырехполюсной обмотки с числом пазов на полюс и фазу $q = 2^1/_4$; при полном шаге $y = 14$ значение числителя $c = 1$ соответствует формуле (В) и дает прямоходовую обмотку, а при $y = 13$ — формуле (Д), дающей обратноходовую обмотку. В обоих случаях принято одно и то же значение второго частичного шага $y_2 = 7$, которое всюду выдерживается; поэтому первые частичные шаги y_1, а вместе с ними и распределение сторон секций по полюсным делениям неодинаковы. Длина перемычек, соединяющих прямые и обратные обходы, в обоих вариантах одна и та же и соответствует одному полюсному делению.

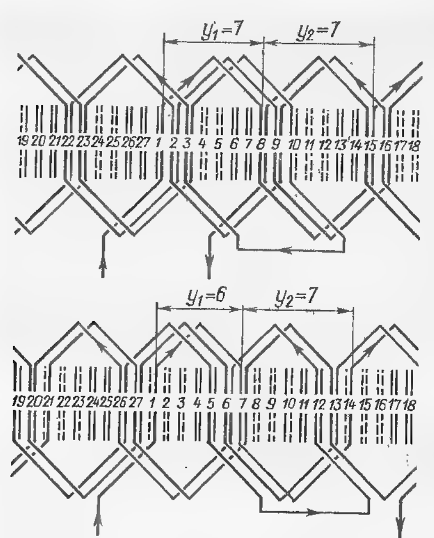


Рис. 6.18. Два варианта четырехполюсной обмотки с $q = 2^1/_4$

При значении числителя $c = 2$, т. е. при $q = 2^2/_4$, возможны два варианта распределения секций, а именно 2 3 3 2 и 2 3 2 3; единичным является только первый из них, а второй представляет двукратное повторение двухполюсной обмотки с $q = 2^1/_2$. Эта обмотка не удовлетворяет ни одной из разновидностей формулы (6.11).

Последним значением числителя при знаменателе $d = 4$ является $c = 3$; оно соответствует формуле (Г) при полном шаге $y = 16$, дающем обратноходовую обмотку, представленную на рис. 6.19, или же формуле (Е), по которой при шаге $y = 17$ получается прямоходовая обмотка. И здесь длина перемычек между прямыми и обратными ходами соответствует полюсному делению. При сравнении рис. 6.19 с рис. 6.18 видно, что различие между ними сводится к тому, что группы из трех секций заменены группами из двух секций и наоборот, чем и подтверждается одинаковость свойств обмоток, у которых сумма числителей равна знаменателю.

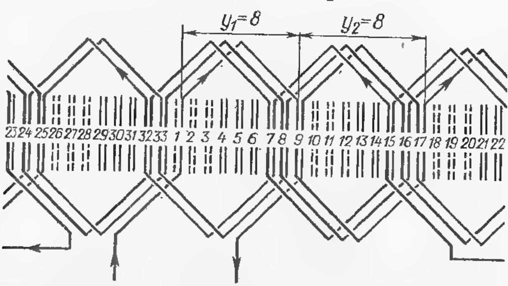


Рис. 6.19. Обмотка с $q = 2^3/_4$

При следующем значении знаменателя $d = 5$ возможны четыре значения числителя: $c = 1, 2, 3$ и 4. Первое из них допускает лишь один вариант распределения сторон секций по полюсным делениям; независимо от принятых шагов он соответствует только одной формуле (А) и дает обратноходовую обмотку.

В главе пятой было показано, что петлевая обмотка с дробным числом пазов на полюс и фазу при нечетных значениях знаменателя состоит из двух одинаковых половин, отличающихся только тем, что направления их обходов противоположны. Эти половины

могут быть соединены как последовательно, для чего в каждой фазе нужно только по одной перемычке, не отличающейся от междуполюсных, так и параллельно при помощи двух подобных же перемычек. Но волновая обмотка при любом числе пазов на полюс и фазу имеет в каждой фазе две части — прямые и обратные обходы, которые могут иметь различный состав и различное расположение в магнитном поле, и потому их последовательное соединение может производиться беспрепятственно, но параллельное возможно далеко не всегда.

Естественным исполнением волновых обмоток при числителе, равном $c = 1$ или $d - 1$, является такой: обмотка делает b полных обходов и еще один или $d - 1$ шагов в том же направлении

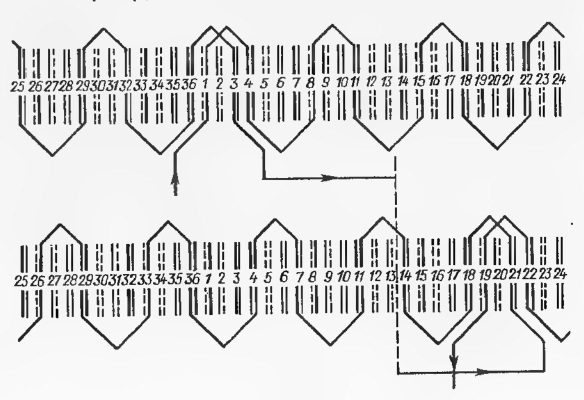


Рис. 6.20. Обмотка с $q = 1^1/_5$

одинаково как для прямых, так и для обратных обходов, как показано на рис. 6.20 для обмотки с $q = 1^1/_5$, где для большей ясности обходы изображены раздельно. Их последовательное соединение производится при этом перемычкой, длина которой соответствует половине окружности обмотки. Поскольку состав и расположение в магнитном поле прямых и обратных обходов вполне одинаковы, их можно соединить и параллельно, но для этого потребуются две такие перемычки.

Однако возможен и другой порядок наложения обмотки, представленный на рис. 6.21: один обход, на рисунке в нижней его части, не содержит никаких дополнительных шагов, которые все перенесены в другой обход — в верхней части рисунка. Параллельное соединение стало невозможным, но зато перемычка между прямыми и обратными обходами стала короче на два полюсных деления, т. е. настолько, сколько дополнительных шагов добавлено к верхней части схемы.

Распределение сторон секций по полюсным делениям на рис. 6.20 было в порядке 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1, как и должно быть для обмотки с нечетным значением знаменателя d; но на рис. 6.21 оно стало в ином порядке: 2 1 2 1 1 1 1 1 1 1, следовательно, эта

обмотка имеет уже другие электрические и магнитные свойства. По существу, она имеет число пазов на полюс и фазу не $1\,{}^1/_5$, а $1\,{}^2/_{10}$, и потому для нее в принципе возможны и другие варианты распределения; согласно табл. 5.1 таких вариантов всего пять, однако не все они в одинаковой степени удобны для выполнения. Так, схема на рис. 6.21 требует только одной перемычки между обходами, но для всякого другого варианта потребуются дополнительные перемычки для задаваемого порядка чередования секций.

Обмотки с числителями, равными единице или знаменателю, уменьшенному на единицу, обладают высокими значениями коэффициентов распределения для основной волны, мало отличающимися от их значений для обмотки с ближайшими целыми числами

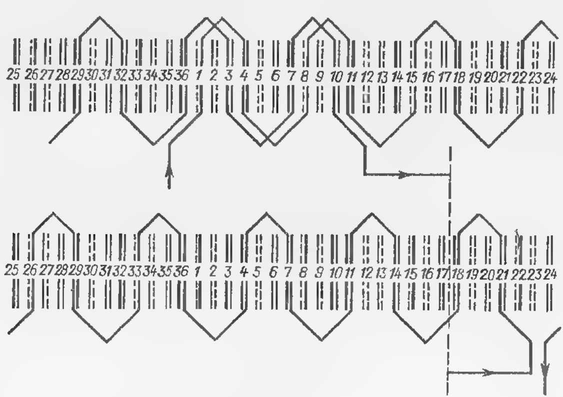


Рис. 6.21. Обмотка с $q = 1^2/_{10}$

пазов на полюс и фазу, и тем в большей степени, чем больше целая часть дроби; даже для обмотки по рис. 6.20, несмотря на минимальное значение целой части, коэффициент распределения достаточно высок: $k_{q1} = 0{,}9561$; он ненамного ниже и для обмотки по рис. 6.21: $k_{q1} = 0{,}9525$, но в то же время как первая имеет нулевое значение коэффициента распределения для двухполюсного поля и для гармонических всех четных порядков, как и должно быть при нечетном знаменателе, вторая имеет довольно высокое значение коэффициента распределения для двухполюсного поля: $k_{q0} = 0{,}2857$; это является ее крупным недостатком.

Подобный способ получения обмоток с дробными числами пазов на полюс и фазу может быть применен и при числителях, отличных от единицы или $d - 1$, но только при условии, что к прямым и обратным обходам добавляются в равном или неравном числе полные шаги как продолжения этих обходов; однако не при всех полных числах пазов он может быть применен, но только при тех, половина которых является нечетным числом, и тогда этот способ дает относительно низкие значения коэффициента распределения.

6.5. ВЫПОЛНЕНИЕ ВОЛНОВЫХ ОБМОТОК С ДРОБНЫМИ ЧИСЛАМИ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ

Обмотки, рассмотренные в предыдущем параграфе, отличались тем, что для их выполнения было достаточно применить в каждой фазе только одну перемычку — между прямым и обратным обходами, длина которой получалась различной в зависимости от принятого распределения; однако это было возможно только в отдельных частных случаях, уподобляющих обмотку с дробным числом пазов на полюс и фазу обмотке с целым числом и освобождающих ее к тому же от местных значений второго частичного шага. В общем же случае становится необходимым применение некоторого числа перемычек и задача выбора схемы обмотки сводится к получению как можно меньшего их числа и как можно меньшей общей длины. Средством для этого является построение либо схемы обмотки по установленным для этого правилам, либо так называемой *табличной схемы*.

Предварительно следует сделать одно существенное замечание. Петлевая обмотка с дробным числом пазов на полюс и фазу полностью определяется чередованием секций каждой фазы на полюсных делениях обеих полярностей, и по виду этого чередования можно с достаточной достоверностью судить о такой важной величине, как коэффициент распределения для основной волны. Но волновая обмотка задается чередованием сторон секций на полюсных делениях только одной полярности, или так называемым *числовым рядом*, между тем как ее свойства определяются чередованием сторон секций на полюсных делениях обеих полярностей, как и для петлевой обмотки, содержащим вдвое больше членов и за редкими исключениями не похожим по структуре. Применение числового ряда становится возможным благодаря тому, что расположение сторон секций на полюсных делениях обеих полярностей определяется однозначно шагами обмотки, между тем как при петлевой обмотке шаги никакой роли в распределении сторон секций не играют и по расположению сторон секций на полюсных делениях одной полярности нельзя судить о том, каково оно будет на полюсных делениях другой полярности.

Прежде чем составлять табличную схему, следует выбрать числовой ряд, дающий требуемые качества обмотки, в первую очередь возможно более высокое значение коэффициента распределения для основной волны. Однако при этом необходимо проверить, не получаются ли слишком высокими коэффициенты распределения для других гармонических, прежде всего самых низких дробных порядков и тех, которые близки к основной волне и определяются формулами (5.12) и (5.14).

Не представляется возможным дать однозначные рекомендации по выбору числового ряда, обеспечивающего максимальное значение коэффициента распределения для основной волны; поэ-

тому надо рассмотреть различные его варианты при данном числе пазов на полюс и фазу и вычислить для каждого из них значение этого коэффициента, применяя способы, описанные в главе пятой. Даже при довольно больших числах возможных вариантов это не представляет особой трудности, потому что нет необходимости производить вычисление для всех возможных вариантов, а лишь для тех, которые обеспечивают наиболее плотные пучки векторов ЭДС пазов, что выясняется обычно после первых же проб.

Пусть, например, требуется выполнить четырнадцатиполюсную обмотку с числом пазов на полюс и фазу $q = 1^3/_7$; полное число пазов этой обмотки составляет

$$Z = 6pq = 6 \cdot 7 \cdot 1^3/_7 = 60;$$

следовательно, между векторами ЭДС соседних пазов в двухполюсном поле будет сдвиг $\alpha = 360°/60 = 6°$, а в поле с 14 полюсами — в 7 раз больше, т. е. 42°.

При данном числе пазов на полюс и фазу согласно табл. 5.1 возможны три варианта числового ряда:

1.	1	1	2	2	2	1	1
2.	1	2	1	2	1	2	1
3.	2	1	1	2	1	1	2

Оси симметрии этих рядов проходят между двумя пазами в серединах рядов; следовательно, для этой средней пары пазов всех трех вариантов отклонения векторов ЭДС от оси симметрии составляют в двухполюсном поле $\pm 3°$, а в четырнадцатиполюсном $\pm 21°$, но чтобы выяснить отклонения ЭДС прочих пазов, надо построить для каждого варианта таблицу по правилу, изложенному в § 5.3; они выглядят следующим образом:

```
     1  1  2  2  2  1  1
1. 2  2  2  1  1  1  1  2
     1  1  1  1  2  2  2

     1  2  1  2  1  2  1
2.    2  1  2  1  1  2  1
     2  1  1  2  1  2  1

     2  1  1  2  1  1  2
3.   2  1  1  2  2  1  1
     1  2  2  1  1  2  1
```

По ним можно составить таблицы угловых положений пазов в полях с любыми числами пар полюсов, что достаточно выполнить только для одной половины какой-либо фазы, например первой. Для двухполюсного поля они будут иметь значения (в градусах):

1.	3	45	51	99	153
2.	3	51	99	105	153
3.	3	51	105	153	159

Для поля с семью парами полюсов эти углы примут значения:

1.	21	315	357	693	1071
2.	21	357	693	735	1071
3.	21	357	735	1071	1113

или же, за вычетом произведений 360° на целые числа,

1.	21	—45	—3	—27	—9
2.	21	—3	—27	15	—9
3.	21	—3	15	—9	33

Такой же вид, только с противоположными знаками, будет иметь и другая половина таблицы. Наиболее сосредоточенным получается пучок векторов для варианта 2, где между соседними векторами будут одинаковые углы по 6°. Следовательно, коэффициент распределения для основной волны будет такой же, как для обмотки с целым числом пазов $q' = 10$; согласно таблице приложения 5 он имеет значение $k_{q1} = 0{,}9554$. Ненамного отстает от варианта 2 и вариант 3, для которого значение коэффициента распределения можно найти в таблице приложения 7; он равен $k_{q1} = 0{,}9449$. Более значительно отставание для варианта 1, для которого в таблицах приложений нет готового значения и его надо вычислить; это даст $k_{q1} = 0{,}9186$.

Таким образом, по признаку наиболее высокого значения коэффициента распределения для основной волны предпочтение следует отдать варианту 2, и можно приступить к составлению табличной схемы. Она имеет вид таблицы с числом столбцов, равным полному шагу обмотки

$$y = \frac{6\,(bd + c) \pm m}{d} = \frac{60 + 3}{7} = 9;$$

здесь m — наименьшее целое число, которое позволяет получить целое значение шага; в данном случае $m = 3$, следовательно, обмотка, сделав семь полных шагов, придет в паз, лежащий через три зубцовых деления за тем, от которого был начат обход, т. е. она является прямоходовой. Число строк таблицы равно частному от деления общего числа пазов на полный шаг:

$$Z/y = 60/9 = 6^6/_9,$$

т. е. составляет шесть полных строк и еще одну неполную строку с шестью клетками. В эти клетки вписываются номера пазов от 1 до Z, и затем таблица разделяется на участки, занимаемые сторонами секций разных фаз и отграничиваемые более жирными линиями; для этого нужно отсчитывать числа клеток в соответствии с принятым числовым рядом от начала и до конца таблицы.

При прямоходовой обмотке эти участки будут постепенно смещаться влево, а при обратноходовой — вправо. Секции с номерами, стоящими один под другим, соединяются естественным образом — своими лобовыми частями; но для прочих соединений

Рис. 6.22. Табличная схема волновой обмотки с $q = 1^3/_7$

A	C′		B	A′		C	B′	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31	32	33	34	H 35	36
37	38	39	40	41	42	43	44	45
46	47	K 48	49	50	51	52	53	54
55	56	57	58	59	60			

должны применяться перемычки, которые наносятся на табличную схему в виде линий. Чтобы не смешивать эти линии с границами фаз, их рекомендуется выполнять штриховыми или другого цвета.

Каждая фаза состоит из двух половин, соответствующих прямому и обратному обходам; если в одной половине фазы обход секций производится сверху вниз, то в другой половине — наоборот, снизу вверх. Задача сводится к тому, чтобы сделать перемычки как можно более короткими; для ее решения требуется определенный навык, поскольку не представляется возможным дать в этом отношении какие-либо твердые правила.

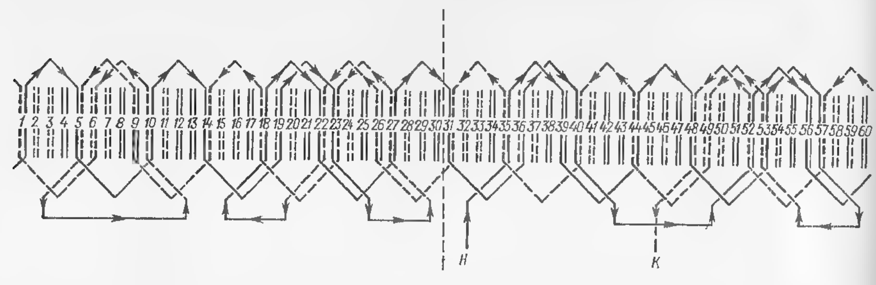


Рис. 6.23. Развернутая схема волновой обмотки с $q = 1^3/_7$

На рис. 6.22 представлена табличная схема рассмотренной обмотки с $q = 1^3/_7$ в варианте 2, на которую нанесены все перемычки, необходимые для одной фазы. Для сравнения на рис. 6.23 представлена развернутая схема этой обмотки, из которой видно, что перемычки более короткими быть уже не могут.

Табличные схемы позволяют вносить в обмотку исправления, например сокращать общую длину перемычек между частями фазы или влиять на электрические и электромагнитные свойства обмотки за счет кругового перемещения некоторых секций из одной фазы в другую, причем к тому же еще так, что числа секций в половинах одной и той же фазы становятся неодинаковыми. Однако здесь не представляется возможным более подробно рассматривать этот сугубо специальный вопрос.

Все вышеизложенное касалось единичных обмоток, однако во многих случаях приходится применять составные обмотки.

При петлевой обмотке составление производной обмотки из нескольких единичных не представляет сложности. В случае последовательного соединения нескольких единичных обмоток оно осуществляется перемычками, не отличающимися от тех, которые служат для соединения между собой групп секций разных полюсных делений; в случае параллельного соединения все единичные обмотки, составляющие производную, присоединяются своими началами и концами к общим сборным шинам.

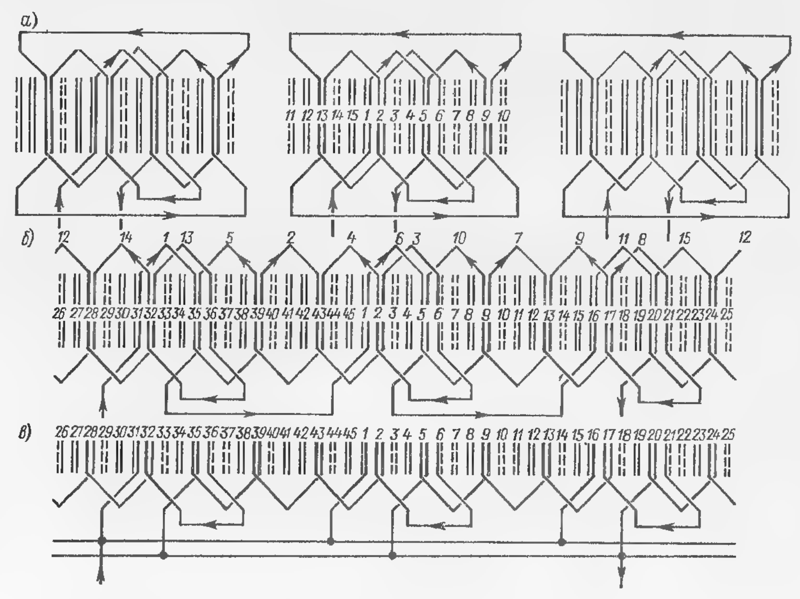


Рис. 6.24. Составление производной обмотки из единичных

Иначе обстоит дело при волновой обмотке. Уже при рассмотрении волновых обмоток с целыми числами пазов на полюс и фазу было установлено, что устройство параллельных ветвей в них сопряжено с определенными трудностями, которые отнюдь не уменьшаются при переходе к дробным числам пазов на полюс и фазу.

Если прямой и обратный обходы выполнены одинаковыми, признаком чего является то, что каждой секции одного обхода можно найти парную, номер которой отличается на половину полного числа пазов, то эти обходы могут быть соединены параллельно, но эта возможность исчезает, как только равенство обходов тем или иным образом нарушается, как об этом было упомянуто.

На рис. 6.24, *а*, *б* дан простейший пример составления производной двенадцатиполюсной обмотки из трех четырехполюсных с $q = 1\,^1/_4$ при их последовательном соединении. Данная единич-

ная обмотка удовлетворяет условию (6.8), но производная обмотка не может удовлетворять ни ему, ни условию (6.14), так как порядок ее составления не должен зависеть от числа входящих в ее состав единичных обмоток, вместе с которым возрастает общее число пазов Z. Этот порядок намечен цифрами, поставленными у головок секций и обозначающими очередность их обхода; если их выписывать строками по $bd + c$, в данном случае по пяти, то цифры каждой следующей строки будут больше цифр предыдущей на это же число, что даст возможность сколь угодно продолжить такую запись, т. е. распространить ее на произвольное число единичных обмоток, составляющих производную.

После обхода $bd + c$ секций дальнейшее соединение производится перемычкой, длина которой на одно полюсное деление меньше части окружности, приходящейся на долю одной единичной обмотки; число таких перемычек на единицу меньше числа единичных обмоток.

Если не считаться с возможностью возникновения уравнительных токов из-за неправильности сборки, то каждая единичная обмотка может быть принята за параллельную ветвь, как показано на рис. 6.24, *в*; в состав каждой из этих ветвей входит одна очередность обхода. Если число единичных обмоток состоит из первоначальных множителей, в простейшем случае — четно, то для устранения уравнительных токов в состав каждой параллельной ветви следует включить равномерно распределенные по окружности обмотки, отчего число параллельных ветвей соответственно уменьшится. При этом перемычки между обмотками, входящими в состав одной параллельной ветви, непроизводительно загромождают зону лобовых частей обмотки, что является серьезным недостатком таких соединений.

Глава седьмая

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ ОБМОТОК МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

7.1. ВИДОИЗМЕНЕННЫЕ ДВУХСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ МНОГОФАЗНОГО ТОКА

В § 2.6 было установлено, что нормально выполненная двухслойная обмотка с диаметральным шагом имеет в каждом пазу две стороны секций одной и той же фазы. По мере укорочения шага появляются пазы, содержащие стороны секций разных фаз, и когда укорочение достигает определенного значения, зависящего от числа фаз m, то не остается ни одного паза, содержащего стороны секций какой-либо одной фазы. В частности, для обмоток трех-

фазного тока это наступает тогда, когда укорочение шага достигает $\beta = 2/3$, а двухфазного — когда $\beta = 1/2$. При этом стороны секций каждой фазы в каждом слое при трехфазном токе занимают 1/3, а при двухфазном — 1/2 числа пазов на плюс mq; в дуговых мерах это можно представить как 60° для трехфазного тока и 90° для двухфазного, причем таких дуг на каждом полюсном делении две на фазу.

На рис. 7.1 в верхней части дан отрезок схемы обмотки трехфазного тока с шагом, укороченным до $\beta = 2/3$. Согласно общим соображениям эта обмотка может быть приведена к диаметральным секциям, что и показано в нижней части рисунка. Здесь каждая фаза на каждом полюсном делении распространена на 2/3 числа пазов на полюс или на дугу 120°, но только одну. Соответственно при двухфазном токе каждая фаза распространится на все $2q$ пазов полюсного деления или на дугу 180°; аналогичное можно установить и для любого иного числа фаз, например $m = 6$, если бы это представило практический интерес.

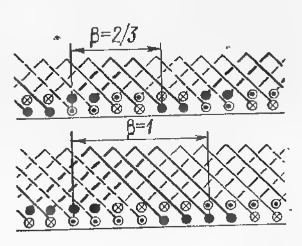
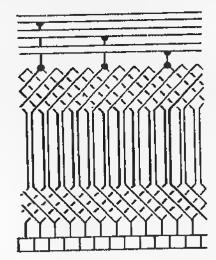


Рис. 7.1. Обмотка трехфазного тока с укорочением шага $\beta = 2/3$


Рис. 7.2. Обмотка двухполюсного якоря с отпайками

Обмотки такого рода отличаются не очень высокими электрическими и электромагнитными свойствами, но в ряде случаев к ним приходится прибегать, так как они представляют либо одно из наиболее приемлемых, либо вообще единственное решение поставленной задачи. Ниже рассматриваются типичные такие случаи.

Первым из них является приспособление обмоток якорей машин постоянного тока к многофазному, в основном трехфазному, току. Эти обмотки всегда представляют замкнутое целое, не имеющее ни начала, ни конца; мало того, в подавляющем большинстве они однородны по всей окружности якоря (исключением являются лишь некоторые разновидности волновых обмоток — искусственно замкнутые или с мертвыми секциями, применяемые в небольших машинах).

Пусть для примера имеется двухполюсный якорь машины постоянного тока, общее число пазов которого кратно шести; это значит, что его обмотка может иметь диаметральный шаг и быть разделена на три вполне одинаковые части (рис. 7.2). Если от

точек такого деления сделать отпайки к трем контактным кольцам, то по отношению к ним обмотка будет симметричной, с целым числом пазов на полюс и фазу, с сопряжением фаз в треугольник и с распространением каждой фазы в одном слое на 120°.

В двухполюсном якоре общее число пазов может быть каким угодно; если оно кратно трем, но нечетно, то и в этом случае обмотка может быть разделена на три вполне одинаковые и одинаково расположенные части, т. е. будет продолжать оставаться симметричной, но уже не с целым числом пазов на полюс и фазу, а с дробным вида

$$q = b + 1/2.$$

Деление обмотки на три части, содержащие одинаковое число секций, возможно и в том случае, когда число пазов не кратно трем, но число сторон секций в пазу кратно трем, как это бывает очень часто. В таком случае число пазов на полюс и фазу будет иметь вид

$$q = b + 1/3 \text{ или } q = b + 2/3;$$

но обмотка не будет симметричной, потому что стороны секций разных фаз расположены неодинаковым образом. Правда, несимметричность здесь незначительна, потому что целая часть b дробного числа пазов даже в относительно небольших машинах довольно высока, поскольку число пазов на полюс в машине постоянного тока обычно больше, чем в машине переменного тока соответствующих размеров.

Наконец, если ни число пазов якоря, ни число сторон секций в пазу не кратны трем, двухполюсная обмотка не может быть разделена на три части, содержащие одинаковые числа секций; однако даже и в этом случае степень несимметричности остается умеренной.

Все сказанное может быть приложено к простой волновой обмотке с любым числом полюсов, не кратным трем; точки присоединения контактных колец в них при принятых условиях всегда лежат под геометрическими углами 120°, а при числах полюсов, кратных трем, их надо отыскивать иначе, так как под углами 120° находятся точки, принадлежащие одному и тому же обходу и соединяющиеся между собой минимальным числом секций.

Все рассмотренные случаи отличаются тем, что по отношению к постоянному току обмотка представляла две параллельные ветви; это и давало возможность представить ее по отношению к трехфазному току в виде замкнутого многоугольника — треугольника. Но уже при простых петлевых обмотках с числом полюсов $2p > 2$ дело осложняется тем, что по отношению к постоянному току они представляют $2a = 2p$ параллельных ветвей, которые образуются, по существу, щеточным аппаратом машины. Правда, даже при самых малых мощностях многополюсные простые петлевые обмотки снабжаются хотя бы минимальным числом уравнительных

соединений, без которых рассматривать обмотку практически нет смысла; теоретически, при идеально правильном исполнении машины, уравнительные соединения не должны быть нагружены никакими токами, пока машина работает только на постоянном токе. Очевидно, что контактные кольца следует присоединять к уравнительным соединениям; тогда по отношению к трехфазному току обмотка будет представлять треугольник с a параллельными ветвями.

Для обеспечения симметричности обмотки прежде всего необходимо, чтобы в каждой ветви между такими тремя уравнительными соединениями было одинаковое число секций; это значит, что общее число секций всей обмотки должно быть кратно трем, а если число пар полюсов тоже кратно трем или любой степени трех, то число секций должно быть кратно утроенному произведению всех этих троек. На рис. 7.3 представлена эквивалентная

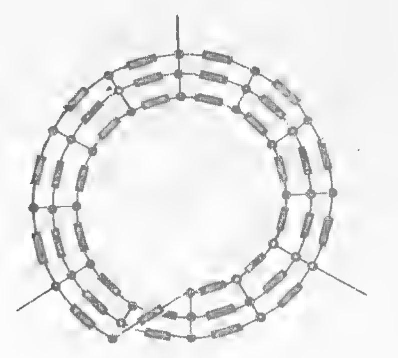


Рис. 7.3. Эквивалентная схема простой петлевой обмотки постоянного тока

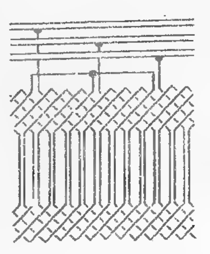


Рис. 7.4. Разрезная обмотка постоянного тока

схема простой петлевой обмотки шестиполюсного якоря, на которой секции изображены в виде сопротивлений. Каждый обход этой схемы на 360° соответствует одной паре полюсов; переход с наибольшего радиуса схемы на наименьший обусловлен только тем, что для возможности изображения уравнительных соединений короткими отрезками схема свернута в три петли, и в обычной схеме ничего подобного этому не было бы. Для упрощения общее число секций дано небольшим, но зато число уравнительных соединений полное, что бывает сравнительно редко — лишь в машинах с тяжелыми условиями коммутации.

В машинах умеренных мощностей полное число уравнительных соединений встречается редко, причем имеющиеся соединения далеко не всегда распределены по окружности якоря вполне равномерно; в этих условиях отыскание точек присоединения отводов трехфазного тока может оказаться затрудненным. Ввиду бесконечного разнообразия возможных сочетаний было бы не-

мыслимо дать здесь исчерпывающие указания; поэтому, если только симметричность присоединения не вполне очевидна, можно лишь рекомендовать построение полной схемы обмотки со всеми уравнительными соединениями и отыскание по ней необходимых точек.

Собственно говоря, для превращения подобной обмотки в обмотку трехфазного тока достаточно было бы только тех трех уравнительных соединений, к которым присоединены отводы; но столь малое число уравнительных соединений встречается лишь в якорях машин очень небольшой мощности. Прочие уравнительные соединения по отношению к трехфазному току играют ту же роль, что и по отношению к постоянному; но если в цепи последнего имеется такой неопределенный элемент, как щеточный контакт на коллекторе с его неустойчивым переходным сопротивлением, то в цепи трехфазного тока его нет и все эти уравнительные соединения необязательны. Следствием является то, что равномерность их распределения отнюдь не нужна.

Однако воспользоваться уравнительными соединениями непосредственно для отводов к контактным кольцам нельзя — их сечение для этого недостаточно. В машине постоянного тока уравнительные соединения нагружены лишь случайными токами, обусловленными небольшими неравенствами потенциалов точек их присоединения и нестабильностью щеточных контактов; поэтому их поперечное сечение составляет обычно 20—25 % поперечного сечения проводников обмотки. Но отводы к кольцам постоянно нагружены переменными токами, поэтому их поперечные сечения должны быть достаточными для этих токов; последнее обстоятельство может составить серьезное затруднение из-за недостатка места для размещения отводов необходимого сечения.

В целом более подходящими для приспособления к трехфазной системе являются волновые обмотки, потому что при них каждая фаза будет содержать большое число секций, различным образом расположенных в поле индуктора, поскольку ни число пазов Z, ни общее число секций не кратны числу пар полюсов. В этих условиях несимметричность фаз, выражающаяся в том, что числа секций в них различаются на единицу, а если и не различаются, то секции не вполне одинаковым образом располагаются в поле индуктора, не может быть настолько существенной, чтобы служить препятствием к работе.

Петлевые обмотки, напротив, имеют числа пазов Z, кратные либо числу полюсов, либо числу их пар; в этих условиях несимметричность фаз сразу распространяется на все секции, связанные между собой уравнительными соединениями, т. е. возрастает по крайней мере в число раз, равное числу пар полюсов. Поэтому в случае выполнения машин с петлевыми обмотками требуется особая осмотрительность, и если результат приспособления к трехфазной системе представляется сомнительным, от последнего предпочтительно отказаться.

Переход к сложным обмоткам — многоходовым, лягушечьим и т. д. не потребует дополнительных разъяснений, однако крупные машины с обмотками двойного тока, служившие главным образом в качестве одноякорных преобразователей — источников постоянного тока с высоким КПД, вытеснены сначала ртутными, а затем полупроводниковыми выпрямителями. Но машины умеренных и небольших мощностей с обмотками постоянного тока, снабженными отводами к контактным кольцам, еще встречаются. Мало того, иногда представляется целесообразным выполнить синхронную машину небольшой мощности в обращенном исполнении — с вращающимся якорем и неподвижным индуктором, используя элементы конструкции машин постоянного тока; ее якорь может при этом вовсе не иметь коллектора.

Последний случай представляет интерес в том отношении, что при нем сопряжение фаз обмотки может быть не только в треугольник, но и в звезду. Действительно, если якорь двухполюсный или имеет простую волновую обмотку с любым числом пар полюсов, т. е. любую обмотку с $2a = 2$, то последнюю можно рассечь на три части в выбранных точках присоединения отводов к контактным кольцам и соединить получившиеся три конца в общую точку — нейтраль (рис. 7.4). Если же обмотка имеет число параллельных ветвей $2a > 2$, то число частей рассекания возрастает в a раз, поскольку каждое уравнительное соединение связывает a эквипотенциальных точек обмотки. Все такие обмотки носят название *разрезных;* в прежние годы им уделялось значительное внимание, но в настоящее время интерес к ним сильно уменьшился, поскольку они потеряли серьезное практическое значение. Поэтому подвергать их более подробному исследованию здесь не имеет смысла; остается только сказать, что разрезными могут быть и все сложные обмотки постоянного тока, кроме лягушечьих.

Другой областью применения обмоток трехфазного тока с распределением на 120° являются асинхронные двигатели с переключением числа пар полюсов; этому вопросу отведено специальное место в § 7.2 и 7.3.

7.2. ОБМОТКИ С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ЧИСЛА ПАР ПОЛЮСОВ В ОТНОШЕНИИ 1 : 2

Многие виды механизмов, приводимых электродвигателями, требуют регулирования числа оборотов в минуту, которое зачастую вполне достаточно производить ступенями; в таких случаях для привода применяются асинхронные двигатели с переключением числа пар полюсов. Наиболее простым случаем является переключение на два числа пар полюсов; такие двигатели называются *двухскоростными.* В большинстве случаев числа пар полюсов относятся как 2 : 1; такое отношение можно получить различными способами, из которых здесь следует рассмотреть следующие три:

а) при обоих числах пар полюсов фазы сопряжены в звезду (рис. 7.5, *а* и *б*); число последовательно включенных витков в каждой фазе остается одним и тем же;

б) при большем числе пар полюсов фазы сопряжены в звезду, а при меньшем — тоже в звезду, но с вдвое бо́льшим числом параллельных ветвей (рис. 7.5, *в* и *г*); число последовательно включенных витков в фазе при меньшем числе пар полюсов вдвое меньше, чем при большем;

в) при большем числе пар полюсов фазы сопряжены в треугольник, а при меньшем в звезду с вдвое бо́льшим числом параллельных ветвей (рис. 7.5, *д* и *е*); число последовательно включенных витков в фазе изменяется так же, как и в предыдущем случае, но вследствие изменения сопряжения фаз оно как бы изменяется в отношении $2 : \sqrt{3}$, что сближает данный способ с первым.

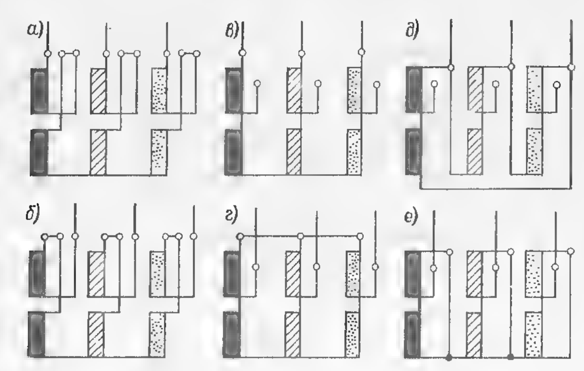


Рис. 7.5. Три способа переключения числа пар полюсов в отношении 1 : 2

Принцип устройства обмотки во всех трех случаях один и тот же: каждая фаза подразделяется на две равные части, в одной из которых направление обхода от начала фазы к концу остается неизменным, а в другой изменяется на обратное, для чего нужно достаточное число выводов. Как видно из рисунка, в первом способе для этого требуется иметь девять выводов, а в остальных двух — по шести; поэтому последние получили более широкое распространение, однако первый удобен при исследовании электрических и электромагнитных свойств обмоток.

На рис. 7.6 представлена в качестве варианта I одна фаза четырехполюсной равносекционной однослойной обмотки в модификации с сосредоточенными лобовыми частями, имеющей $q = 2$ пазов на полюс и фазу. Изменение направления обхода в одной ее половине превращает обмотку в двухполюсную с числом пазов на полюс и фазу $q = 4$, т. е. удвоенным против исходного. В четырехполюсной обмотке полярность создаваемой ею МДС изменяется на обратную при переходе через каждую группу рядом лежащих пазов, имеющих одинаковое направление обхода от начала фазы к ее концу; но в двухполюсной обмотке в промежутках

между группами секций МДС равна нулю, а разную полярность она имеет только в пределах каждой группы секций. График МДС фазы после переключения стал заметно хуже, но его наибольшие ординаты удвоились.

На рис. 7.7 аналогичные преобразования произведены при другой модификации однослойной равносекционной обмотки — с равномерно распределенными лобовыми частями (вариант II). При четырех полюсах МДС ничем не отличается от предыдущего случая; но после переключения на два полюса, как и при четырех полюсах, она изменяет знак при переходе через группы пазов

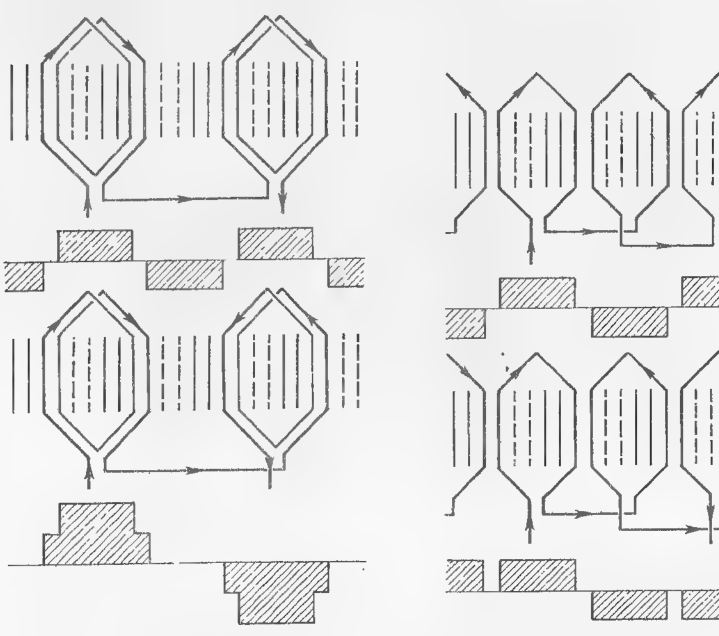


Рис. 7.6. Изменение графика МДС при переключении числа пар полюсов обмотки с сосредоточенными лобовыми частями

Рис. 7.7. Изменение графика МДС при переключении числа пар полюсов обмотки с равномерно распределенными лобовыми частями

с одинаковыми направлениями обхода, но в промежутках между такими группами лежат группы с противоположными направлениями обхода, действие которых практически взаимно компенсируется. Если не считать провалов графика МДС в таких местах, он мало изменился по форме после переключения; но его наибольшие ординаты остались без изменения.

Если теперь перейти к двухслойной обмотке, которую для одинаковости условий принять диаметральной при большем числе пар полюсов (вариант III), то при этом последнем график МДС фазы не будет отличаться от всех предыдущих вариантов; после переключения отличие от варианта II будет состоять лишь в том,

что провалов в графике нет, потому что стороны секций с противоположными направлениями обходов попадают в одни и те же пазы и потому компенсируют друг друга, как это видно на рис. 7.8. Таким образом, применение при большем числе пар полюсов обычных форм двухслойной и однослойной обмоток нецелесообразно, так как при переключении на меньшее число пар полюсов обмотка получает низкие электрические и электромагнитные качества — половина общего числа сторон секций не работает.

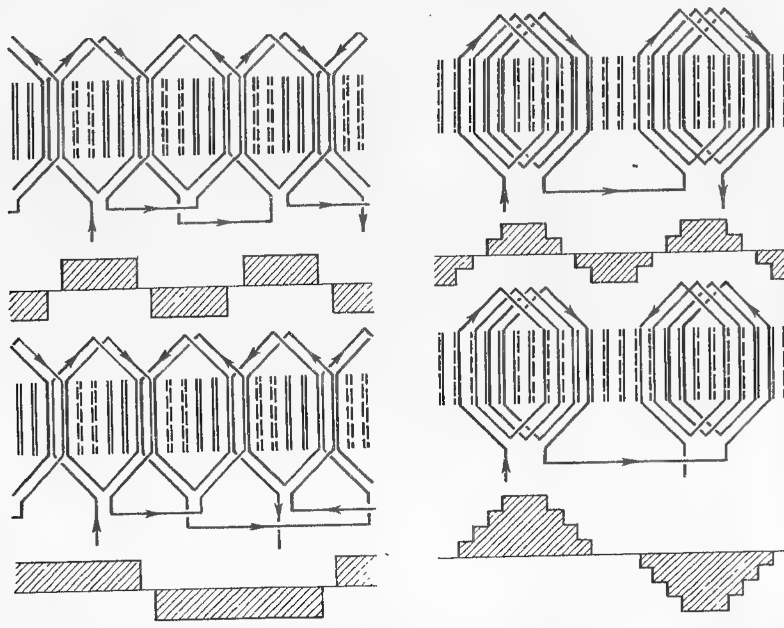


Рис. 7.8. Изменение графика МДС при переключении числа пар полюсов двухслойной обмотки обычного исполнения

Рис. 7.9. Изменение графика МДС при переключении числа пар полюсов видоизмененной двухслойной обмотки

С другой стороны, однослойная обмотка в модификации с сосредоточенными лобовыми частями, дающая значительно лучший результат при уменьшении числа пар полюсов, менее удобна в исполнении, чем при равномерном распределении лобовых частей.

На рис. 7.9 показана двухслойная обмотка, имеющая при большем числе пар полюсов диаметральный шаг и распределение на 120° (вариант IV). График МДС фазы имеет заметно лучшую форму, которая сравнительно мало ухудшается после переключения на меньшее число пар полюсов, а наибольшие ординаты его возрастают вдвое, как и у однослойной обмотки на рис. 7.6; но теперь обмотка представляет нормальную двухслойную с удвоенным числом пазов на полюс и фазу, только шаг ее укорочен до $\beta = 1/2$.

Рис. 7.10. Сопоставление графиков МДС различных вариантов исполнения обмотки с переключением числа пар полюсов в отношении 1 : 2

На рис. 7.10 представлены графики МДС всех рассмотренных вариантов обмоток для двух случаев распределения токов в фазах: когда ток в одной из фаз достигает наибольшего значения, а в двух других — его половины и когда ток в одной из фаз равен нулю, а в двух других одинаков. Их сопоставление ясно показывает, насколько вариант IV превосходит своим качеством все предыдущие. Из этих графиков видно, что за интервал времени между следующими друг за другом моментами с указанными выше случаями распределения токов в фазах оси графиков при меньшем числе пар полюсов переместились на вдвое большее расстояние, чем при большем числе пар полюсов, что и соответствует удвоению числа оборотов в минуту, но только в противоположную сторону. Этого и следовало ожидать на основании соображений, изложенных по поводу рис. 2.30; для сохранения прежнего направления вращения поля при удвоении числа пар полюсов необходимо изменить чередование фаз обмотки.

Графики МДС на всех предшествующих рисунках построены в относительных единицах и не учитывают то обстоятельство, что число последовательно включенных витков в фазе при переключении может либо остаться тем же самым, либо измениться до двух раз, и это не может не отражаться на свойствах двигателя, снабженного такой обмоткой. Эти последние определяются в первую очередь магнитным состоянием машины, для которого наиболее характерной величиной является индукция в зазоре, точнее — амплитуда ее основной волны, для которой можно написать

$$B_{m1} = \frac{E_1}{2\sqrt{2} k_{w1} f l \tau w},$$

где k_{w1} — обмоточный коэффициент для основной волны; E_1 — действующее значение основной волны фазной ЭДС, В; f — ча-

стота питающего тока, Гц; l — осевая длина сердечника, м; τ — полюсное деление, м; w — число последовательно включенных витков в фазе.

Для одного и того же двигателя при работе в нормальных эксплуатационных режимах следует считать практически неизменными величинами E_1, f и l; поэтому данное равенство можно переписать так:

$$B_{m1} = \frac{C}{k_{w1}\tau w}. \qquad (7.1)$$

При переключении числа пар полюсов в отношении 2 : 1 полюсное деление τ возрастает вдвое; обмоточный коэффициент k_{w1}, несомненно, должен измениться, поскольку изменяется число пазов на полюс и фазу, а вместе с ним и укорочение шага, но это изменение не может быть очень значительным; что же касается числа витков, находящихся в последовательном соединении, то оно либо остается неизменным, как при способе *а*, либо изменяется вдвое, так же как число пар полюсов, — при способе *в*, либо, наконец, сравнительно мало изменяется, как при способе *д* (обозначения способов по рис. 7.5).

Если бы обмоточный коэффициент при переключении остался неизменным, то в первом случае индукция уменьшилась бы вдвое; во втором, напротив, она осталась бы неизменной; в третьем ее изменение лишь ненамного отличалось бы от первого случая. Изменение обмоточного коэффициента несколько нарушает эти соотношения; но, если бы это было нужно, в принципе можно подобрать такое укорочение шага при меньшем числе пар полюсов и соответственно удлинение при большем, чтобы этот коэффициент остался практически неизменным.

Если обозначить через q число пазов на полюс и фазу при большем числе пар полюсов, то коэффициент распределения при меньшем будет равен

$$k'_{q1} = \frac{\sin\frac{\pi}{6}}{2q\sin\frac{\pi}{12q}} = \frac{1}{4q\sin\frac{\pi}{12q}},$$

а при большем, поскольку при нем обмотка распределена на 120° или на $2q$ пазов,

$$k''_{q1} = \frac{\sin\frac{\pi}{3}}{2q\sin\frac{\pi}{6q}} = \frac{\sqrt{3}}{4q\sin\frac{\pi}{6q}}.$$

При шаге y коэффициент укорочения шага при меньшем числе пар полюсов будет

$$k'_{y1} = \sin\frac{y}{6q}\frac{\pi}{2} = \sin\frac{y\pi}{12q},$$

а при большем

$$k''_{y1} = \sin\frac{y}{3q}\frac{\pi}{2} = \sin\frac{y\pi}{6q}.$$

Для равенства обмоточных коэффициентов необходимо равенство произведений коэффициентов распределения на коэффициенты укорочения шага, которое нетрудно привести к виду

$$\frac{\sin\frac{y\pi}{6q}}{\sin\frac{y\pi}{12q}} = \frac{\sin\frac{\pi}{6q}}{\sqrt{3}\sin\frac{\pi}{12q}}.$$

Преобразование его по формуле

$$\sin 2\alpha = 2\sin\alpha\cos\alpha$$

дает

$$\frac{1}{\sqrt{3}}\cos\frac{\pi}{12q} = \cos\frac{y\pi}{12q}. \qquad (7.2)$$

Подстановка сюда различных значений q приводит к дробным значениям искомого шага y, которые нужно округлять до ближайших целых; чем ближе округление, тем точнее выдерживается требуемое равенство обмоточных коэффициентов. Ниже приведены значения обмоточного коэффициента для основной волны при обоих числах пар полюсов обмоток, которые при большем числе пар полюсов имеют число пазов на полюс и фазу q, вычисленные по значениям шага y, найденным вышеописанными путем:

Число пазов q . . .	1	2	3	4	5	6
Шаг обмотки y . . .	4	7	11	15	18	22
Обмоточный коэффициент при числе полюсов:						
меньшем	0,8365	0,7598	0,7832	0,7946	0,7729	0,7825
большем	0,7500	0,8080	0,7811	0,7662	0,7879	0,7781
Отношение обмоточных коэффициентов	1,115	0,940	1,003	1,037	0,981	1,006

Таким образом, за исключением только случая $q = 1$, не представляющего сколько-нибудь серьезного интереса, удается получить практически одинаковые значения обмоточных коэффициентов для основной волны при обоих числах пар полюсов; но здесь следует напомнить, что равенство индукций при них можно получить только в том случае, когда число последовательно включенных витков в фазе изменяется прямо пропорционально числу пар полюсов, т. е. при способе *в* (см. рис. 7.5). При способах *а* и *д*, когда число витков либо не изменяется, либо изменяется незначительно, достичь равенства индукций при обоих числах пар полюсов становится практически невозможным.

Выбор способа переключения определяется требованиями, предъявляемыми к двигателю при обоих числах пар полюсов;

рассматривать их здесь не представляется возможным. Нужно лишь обратить внимание на то, что при способе *а* поперечное сечение проводников обмотки остается неизменным, следовательно, при обоих числах пар полюсов номинальный ток может различаться лишь в той степени, в которой этому будет способствовать общее улучшение вентиляции при меньшем числе пар полюсов. Отсюда следует, что и номинальная мощность двигателя не будет претерпевать существенного изменения; при меньшем числе пар полюсов он будет недоиспользован по магнитным нагрузкам. По этой причине двигатель с таким переключением может быть в известной степени назван *двигателем постоянной мощности*. Выше было указано, что способ *а* практически не применяется, так как требует девяти выводов обмотки; но близким к нему является широко распространенный способ *д*.

При способе *в*, особенно когда использована возможность выравнивания обмоточных коэффициентов, сечение проводников обмотки изменяется обратно пропорционально числу пар полюсов и числу последовательно включенных витков. Поэтому при меньшем числе пар полюсов номинальный ток, а вместе с ним и мощность двигателя по крайней мере удваиваются; при обоих числах пар полюсов двигатель в магнитном отношении практически одинаково хорошо использован. Поскольку мощность представляет произведение угловой частоты на вращающий момент, последний не претерпевает существенных изменений, и потому двигатели с таким способом переключения могут быть названы *двигателями постоянного момента*.

Конечно, оба эти названия являются условными; в зависимости от требований каждого данного случая изготовитель двигателя может в той или иной степени варьировать его свойства, в первую очередь за счет отклонения обмоточного коэффициента в ту или иную сторону от указанных выше значений.

Немаловажным фактором при выборе способа переключения является количество необходимой для него аппаратуры, которое желательно иметь минимальным. Для способов включения *в* и *д* во всех случаях достаточно по одному выключателю, пригодному для операций под током, для каждого числа пар полюсов и одного короткозамыкателя для получения нейтральной точки в схемах с двумя параллельными ветвями, не предназначенного для размыкания под током, с блокировками против неправильных сочетаний.

Для способа *а* нужно иметь помимо двух выключателей еще два короткозамыкателя; таким образом, и в этом отношении способ *а* уступает способам *в* и *д*. При низком напряжении и небольших мощностях вся эта аппаратура может быть заменена двумя трехполюсными переключателями, а вместо блокировок могут быть просто объединены их траверсы.

Асинхронные двигатели с фазными роторами исключительно редко изготовляются с переключением числа пар полюсов; в этом

случае они должны снабжаться шестью контактными кольцами и обмоткой ротора, выполненной по первому (*а*) из рассмотренных способов — единственному, при котором соединение частей фаз при обоих числах пар полюсов сохраняется последовательным. Тогда пуск при большем числе пар полюсов должен производиться с присоединением пускового реостата к тем трем кольцам, к которым выведены концы фазных обмоток, сопряженных в звезду, а при меньшем числе пар полюсов — с замыканием этих трех колец накоротко и присоединением пускового реостата к трем другим кольцам.

В крайнем случае можно обойтись только тремя кольцами; тогда пуск при большем числе пар полюсов должен производиться с подключением к ним пускового реостата, а переход к меньшему числу пар полюсов — только при вращающемся роторе с замкнутыми накоротко кольцами (разумеется, с изменением порядка чередования фаз); пуск при меньшем числе пар полюсов из неподвижного состояния становится при этом практически невозможным, поскольку начальный вращающий момент двигателя с замкнутым накоротко фазным ротором обычно мал.

Явнополюсные синхронные машины с переключением числа пар полюсов в отношении 1 : 2 не изготовляются, так как они имели бы плохие характеристики; но неявнополюсные в принципе могут быть выполнены как с четырьмя, так и с тремя контактными кольцами на роторе, т. е. с подразделением обмотки ротора на две равные части. В первом случае каждая часть должна быть выведена к своей паре контактных колец, что позволяет изменять направление тока в любой из них, а во втором обе части присоединяются одним концом к общему контактному кольцу, а другим концом — к одному из остающихся колец. Тогда их питание может производиться либо последовательно, либо параллельно — через общее кольцо и два других, соединенных вместе. Но в первом случае порядок напряжения и тока возбуждения сохраняется при обоих числах пар полюсов на одном и том же уровне, между тем как во втором изменяется примерно вдвое, что создает затруднения с подбором источника возбуждения.

7.3. ОБМОТКИ С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ЧИСЛА ПАР ПОЛЮСОВ В ОТНОШЕНИЯХ, ОТЛИЧНЫХ ОТ 1 : 2

Переключение чисел пар полюсов в отношении 1 : 2 хотя и применяется чаще других, но не является единственным возможным; находят применение переключения в отношениях 2 : 3, 3 : 4, а иногда также 1 : 3 и 1 : 4. В сравнительно недавнее время нашли применение двигатели значительной мощности с переключениями в отношениях 4 : 5 и 5 : 6, а также 3 : 5. Эта шкала переключений может удовлетворить практически всем встречающимся случаям. Числа пар полюсов, кратные семи, находившие ранее применение в связи с бывшими тогда традиционными

числами оборотов в минуту поршневых двигателей, паровых и внутреннего сгорания, и насосов (428, 214, ...), в настоящее время полностью вышли из употребления.

Промышленностью выпускаются двигатели с переключениями на три и даже четыре различных числа пар полюсов, например в отношениях 1 : 2 : 3 : 6 или 1 : 2 : 4 : 8, частично однообмоточные. Изобилие предлагаемых схем таких переключений настолько велико, что не представляется возможным их здесь охватить, и для подробного ознакомления с этим вопросом следует обращаться к специальным источникам; далее излагаются только общие соображения, позволяющие в нем разобраться. Следует оговорить, однако, что в однообмоточном двигателе с любым переключением чисел пар полюсов крайне трудно получить все качества двигателей без переключения. Заявления авторов таких схем, что якобы при всех числах пар полюсов двигатель с предлагаемой обмоткой обладает качествами, не худшими, чем у двигателей соответствующих мощностей без переключений, являются сомнительными.

Простейшим решением вопроса об изменении частоты вращения двигателя переменного тока в любом отношении, особенно при высоком напряжении, является наложение на один и тот же сердечник двух независимых обмоток; соотношение их чисел пар полюсов может быть произвольным, а преимуществом является минимальное число выводов, равное шести, и количество необходимой аппаратуры — для каждой частоты вращения требуется только один выключатель. Однако главным недостатком такого решения является низкая степень использования машины, поскольку примерно половина полезного объема пазов сердечника при каждом из чисел пар полюсов не используется. Поэтому такой двигатель по своей массе, а следовательно, и по стоимости значительно уступает двигателям соответствующих мощностей с одним числом пар полюсов, хотя по своим электрическим и экономическим показателям может быть на уровне их лучших образцов.

Если вывести начала и концы всех секций обмотки на соответствующий коммутатор, то можно выполнить соединения на любые числа пар полюсов, которые осуществимы при данном шаге обмотки; однако такое решение чрезмерно громоздко даже при низком напряжении, а при высоком вообще неосуществимо. Предельно приемлемым числом выводов при низком напряжении следует считать 24, а при высоком — 12, но желательно по возможности не доходить и до этих пределов.

Кроме всего прочего, обмотки с переключением числа пар полюсов должны удовлетворять требованиям технологичности исполнения наряду с обычными обмотками; в частности, желательно, чтобы все секции были одинаковы не только по форме и размерам, но и по числу витков и сечению проводников. Однако последнему требованию не всегда удается удовлетворить.

Когда одно из чисел пар полюсов равно единице, сердечники обеих частей машины, особенно статора, должны быть рассчитаны на приемлемые значения индукции для магнитного потока, распределяющегося по половине окружности машины; при следующем числе пар полюсов, равном двум, при условии сохранения на одном и том же уровне индукции в зазоре становится вдвое меньшей индукция в сердечниках обеих частей, что указывает на резкое понижение степени использования машины в целом. Это становится особенно наглядным, когда основным для данной машины является режим работы не при одной паре полюсов; отсюда следует, что применение числа пар полюсов, равного единице, в обмотках с переключениями в общем нежелательно.

Если числа пар полюсов, на которые рассчитывается обмотка, сильно различаются, как, например, 1 : 2, 1 : 3 или 1 : 4, то при переходе одного из них к другому неизбежно изменение либо числа параллельных ветвей, либо сопряжения фаз, либо и того и другого. Зачастую также может оказаться, что при меньшем числе пар полюсов часть обмотки становится избыточной, что ведет к понижению магнитного потока, а вместе с ним и мощности машины, или же к тому, что в одних и тех же пазах оказываются проводники с прямо противоположными направлениями токов. В таких случаях целесообразно отключение части секций, что, однако, может более или менее сильно осложнить схему обмотки.

Существуют две разновидности схем переключения чисел пар полюсов: схемы, при которых все секции обмотки остаются в одних и тех же фазах, но только в половине их числа изменяется направление обхода, и схемы, при которых в каждой фазе остается только некоторая часть ее секций, а остальные переходят в другие фазы; в обеих разновидностях может применяться отключение некоторой части секций. Все рассмотренные выше схемы с переключением в отношении 1 : 2 относятся к первой разновидности.

Изменение числа пар полюсов носит общее название *модуляции;* при первой разновидности к нему прибавляется определение «полюсная», а при второй — «фазная»; иногда к обоим определениям добавляется еще слово «амплитудная», хотя особой необходимости в этом нет.

Когда числа пар полюсов обмотки прямо равны числителю и знаменателю их отношения, то по аналогии с обмотками, имеющими дробные числа пазов на полюс и фазу, такая обмотка может быть названа *элементарной* независимо от того, целыми или дробными являются числа пазов на полюс и фазу; если же числа пар полюсов являются произведениями числителя и знаменателя их отношения на какое-нибудь целое число, то обмотка может быть названа *производной*. Как правило, производная обмотка является многократным повторением элементарной обмотки и каждая из последних может служить ее параллельной ветвью. Однако

обмотка с такими числами пар полюсов может и не быть повторением элементарной обмотки, если это улучшает ее свойства или упрощает схему.

Одно из чисел пазов на полюс и фазу, а иногда и оба могут быть дробными; это несколько затрудняет модуляцию, и потому желательно по возможности обходиться целыми числами. За исходную обмотку при полюсной модуляции может быть принята только часть с целым числом пар полюсов, поскольку в противном случае разделение ее на четное число частей становится затруднительным. Кроме того, в общем удобнее, чтобы число пазов на полюс и фазу исходной обмотки было целым.

Идея полюсной модуляции состоит в том, что каждая фаза исходной обмотки подразделяется на некоторое четное число одинаковых частей, в половине из которых направление обхода остается неизменным, а в другой половине изменяется на обратное. Число таких пар должно быть равно разности чисел пар полюсов элементарной обмотки до и после модуляции; но, за исключением редко применяемых соотношений 1 : 3 и 1 : 4, оно равно единице, так как единственное соотношение, которое могло бы дать две пары, — это 3 : 5, однако при нем оба числа пар полюсов нечетны и разделять каждую фазу обмотки на четыре равные части затруднительно.

Однако если подвергнуть модуляции обмотку с обычным распределением секций по полюсным делениям, когда при целых числах пазов на полюс и фазу на каждой паре полюсных делений находится одно и то же число секций каждой фазы, а при дробных числах оно кое-где различается на единицу, то в результате модуляции получится неудовлетворительный график распределения МДС — хотя он и будет иметь нужное число пар полюсов, но на разных полюсных делениях его площадки будут очень различаться, что свидетельствует о наличии сильно выраженных гармонических низших порядков.

Основным средством устранения этого недостатка является изменение распределения секций по полюсным делениям с таким расчетом, чтобы в каждой из частей подразделяемой фазы оно по возможности приближалось к синусоидальному: числа секций по краям каждой части уменьшаются, а в ее середине настолько же увеличиваются, так что общее число их остается прежним. При этом некоторые секции по краям частей иногда даже включаются навстречу прочим, что еще более приближает распределение к синусоидальному

Следует иметь в виду, что для перехода от меньшего числа пар полюсов к большему нужно сдвигать распределения разных фаз на 1/3 окружности элементарной обмотки по направлению чередования фаз, а для перехода от большего числа пар полюсов к меньшему — против направления их чередования. При этом в обоих случаях направление вращения поля после модуляции изменяется на обратное, как и в случае переключения числа пар

полюсов в отношении 1 : 2, которое тоже можно рассматривать как частный случай полюсной модуляции:

На рис. 7.11 представлена операция модулирования восьмиполюсной обмотки с числом пазов на полюс и фазу $q = 1^1/_2$ в десятиполюсную. Оба числа пар полюсов не кратны трем, и потому распределение секций во всех фазах и до и после модуляции одинаковое, т. е. обе обмотки симметричны.

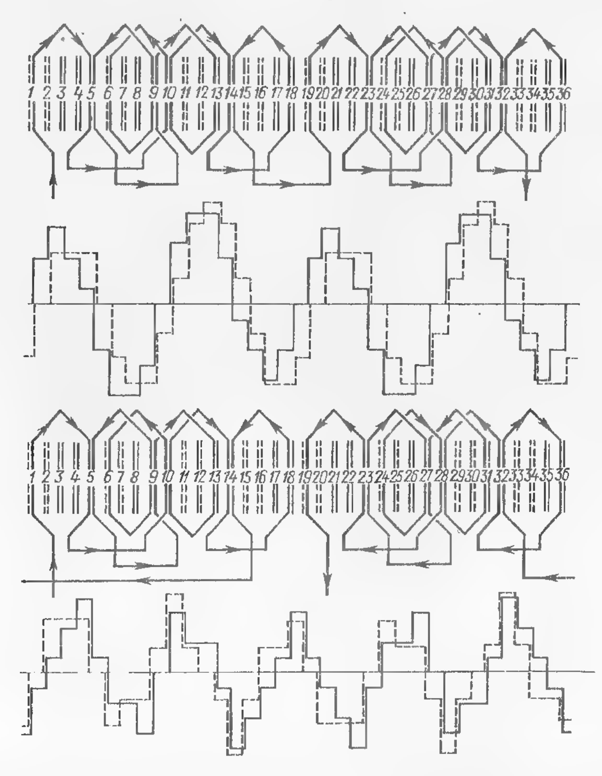


Рис. 7.11. Обмотка с переключением числа пар полюсов в отношении 4 : 5 посредством полюсной модуляции

При $q = 1^1/_2$ обычным распределением секций по полюсным делениям является их чередование в порядке 1 2 1 2 ...; однако в данном случае его следует изменить для возможного приближения к синусоидальному, приняв порядок 1 2 2 1 ...; в результате при $2p = 8$ график МДС несколько ухудшается по сравнению с нормальным для такой обмотки, но зато при $2p = 10$ он приобретает достаточно приемлемые очертания.

Следует учитывать, что столь малые числа пазов на полюс и фазу не характерны для машин с таким переключением числа пар полюсов, которое встречается главным образом в машинах более или менее крупной мощности — сотни и даже тысячи ки-

ловатт, а с увеличением числа пазов на полюс и фазу формы графиков МДС быстро улучшаются, хотя все же уступают соответствующим обычному распределению секций в немодулируемых обмотках.

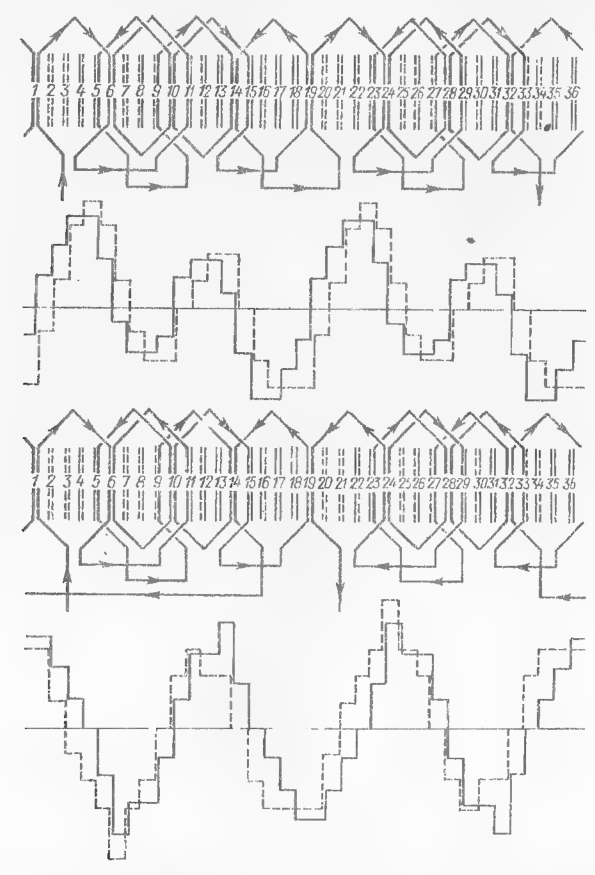


Рис. 7.12. Обмотка с переключением числа пар полюсов в отношении 4 : 3 посредством полюсной модуляции

Если одно из чисел пар полюсов кратно трем, то операция модулирования осложняется тем, что под углами 120° в элементарной обмотке при таком числе находятся секции одной и той же фазы и потому распределение секций не может быть вполне симметричным и схемы соединений фаз должны быть различны.

На рис. 7.12 представлена операция модулирования обмотки с тем же числом полюсов $2p = 8$ и с тем же распределением секций в первой фазе 1 2 2 1 ... к числу полюсов, кратному трем: $2p = 6$. Тогда во второй фазе можно будет принять распределение в порядке 1 3 2 0, а в третьей — в порядке, обратном этому, т. е. 0 2 3 1; здесь 0 обозначает, что на некоторых полюсных делениях вообще нет секций данной фазы. Несмотря на то что число пазов на полюс и фазу модулированной обмотки всего только $q = 2$, форма графиков МДС после модуляции в общем не хуже, чем до нее.

Другим средством улучшения формы графиков МДС при модуляции является исключение части секций в каждой фазе, особенно часто применяемое тогда, когда одно из чисел пар полюсов кратно трем, поскольку оно тоже помогает уменьшать неудобство, вносимое таким числом. Исключение части секций технически более целесообразно при меньшем числе пар полюсов, поскольку способствует сохранению индукции в зазоре примерно на одном и том же уровне, как это уже рассматривалось в § 7.2; между тем в действительности зачастую приходится наблюдать обратное — исключение части секций при большем числе пар полюсов, что понижает степень использования объема машины и, по существу, может считаться целесообразным лишь тогда, когда режим работы при большем числе пар полюсов является лишь вспомогательным.

С этим же обстоятельством связан выбор шага секций, который остается при модуляции постоянным; но коэффициент его укорочения соответственно изменяется. В общем, если при меньшем числе пар полюсов шаг является укороченным, то при большем он должен бы становиться удлиненным, что тоже способствует поддержанию уровня индукции в зазоре и было рассмотрено в том же § 7.2.

При отключении части секций или при применяемом иногда встречном их включении уменьшается число действующих пазов на полюс и фазу, однако, тем не менее, его следует относить к общему числу пазов, которым определяется сдвиг между соседними пазами, необходимый для вычисления коэффициентов распределения.

Если ни одно из двух чисел пар полюсов не кратно трем, то вследствие одинаковости всех трех фаз их коэффициенты распределения также одинаковы; но если, как было указано выше, приходится применять различные распределения секций в фазах, то эти коэффициенты также различны. В наиболее общем случае их приходится вычислять особо — одним из способов, описанных в § 3.5. Сдвиги между фазами становятся отличными от 120°, и условное общее значение коэффициента распределения приходится вычислять по формуле

$$k_q = \frac{1}{3}\left[k_{q1} + k_{q2}\cos\left(\varphi_2 - \frac{\pi}{3}\right) + k_{q3}\cos\left(\varphi_3 - \frac{2\pi}{3}\right)\right],$$

где k_{q1}, k_{q2} и k_{q3} — частные значения коэффициентов распределения фаз 1, 2 и 3, а φ_2 и φ_3 — сдвиги фаз 2 и 3 по отношению к фазе 1, за которую принимается фаза с распределением, отличным от двух других.

Одним из недостатков обмоток с полюсной модуляцией является повышенное число выводов, которое не может быть мень-

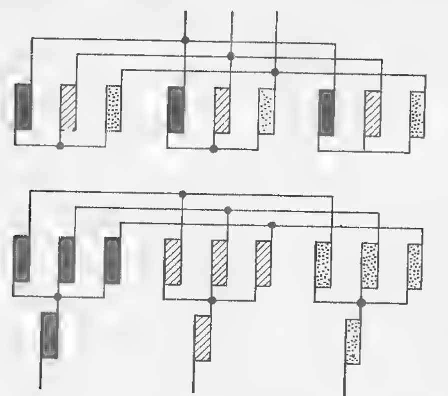


Рис. 7.13. Принципиальная схема переключения при фазной модуляции

шим девяти, и то лишь при условии, что начала фаз на рис. 7.11 и 7.12 соединяются в нейтраль, а линейными выводами при каждом числе пар полюсов являются свои выводы, показанные на схемах как выходы. Если применяется отключение части секций при одном из чисел пар полюсов, то должны быть добавлены еще три вывода, всего таким образом их становится 12. Для каждой машины достаточно иметь один выключатель, но к нему должна быть добавлена аппаратура для изменения схемы и его подключения к тем или иным выводам.

В целом применение полюсной модуляции, бесспорно, способствует повышению степени использования объема машины по сравнению с машинами, имеющими отдельные обмотки для каждого числа пар полюсов; но наряду с этим нельзя не считаться с трудностями выполнения соединений между секциями по сложным схемам, правильность которого с трудом поддается проверке.

В отличие от полюсной модуляции фазная модуляция не только пригодна, но и особенно удобно осуществляется тогда, когда одно из чисел пар полюсов кратно трем, причем соответствующую ему схему обмотки следует принимать за исходную. Для нее каждая фаза обмотки разбивается либо на три равные части, либо на четыре, которые уже не могут быть одинаковыми в отношении расположения секций, но имеют равные числа секций.

Одна часть остается в своей фазе, другая переходит во вторую и еще одна — в третью, а четвертая часть, если она имеется, исключается вовсе. Каждая фаза при обоих числах пар полюсов содержит по три параллельные ветви, точки соединения которых при модуляции становятся нейтралями, и наоборот, три нейтрали обмотки превращаются в точки соединения параллельных ветвей в фазах, как показано на рис. 7.13. Четвертая часть каждой фазы, отключаемая обычно при переходе от большего числа пар полюсов к меньшему, состоит из секций, имеющих втрое меньшее число витков, чем прочие, но зато втрое большего сечения; при большем числе пар полюсов она включается последовательно с тремя параллельными ветвями своей фазы, а при меньшем остается только придатком к нейтрали. Таким образом, при фазной модуляции обмотка имеет только шесть выводов — не больше, чем в машине с двумя независимыми обмотками, что представляет бесспорное преимущество фазной модуляции, особенно при высоком напряжении.

На рис. 7.14 приведен пример обмотки с модуляцией от трех пар полюсов к двум. В его верхней части помещена схема немодулированной шестиполюсной обмотки, которая по своим электрическим свойствам совершенно аналогична нормальной двухслойной обмотке с тем же числом пазов на полюс и фазу $q = 2$, однако

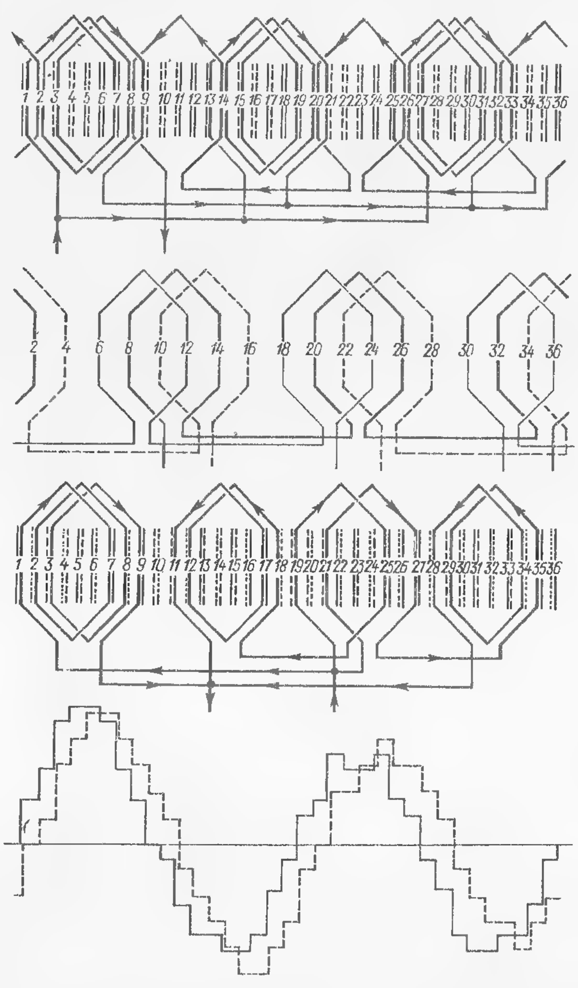


Рис. 7.14. Обмотка с переключением числа пар полюсов в отношении 3 : 2 посредством фазной модуляции

ее устройство отличается от обычной обмотки прежде всего тем, что в одной из фаз секции распределены по полюсным делениям в порядке 3 1 3 1 3 1, а в двух других — в порядке 2 2 2 ..., как это можно видеть по их условным обозначениям на схеме. Три группы, каждая из трех секций, составляют три параллельные

ветви первой фазы, а последовательно с ними включены три отключаемые при модуляции и показанные отдельно ниже секции. Во всех трех фазах секции всех параллельных ветвей расположены в магнитном поле одинаково, чем обеспечивается отсутствие существенных уравнительных токов между ними.

После модуляции все три группы основной части первой фазы, состоящие каждая из трех секций, становятся группами трех фаз, параллельно к которым присоединяются еще по две группы из трех секций, но лежащих уже не рядом, а разбросанных по окружности с таким расчетом, чтобы предотвратить возникновение уравнительных токов между параллельными ветвями по причине неодинаковости расположения секций в магнитном поле. В третьем ряду на рис. 7.14 дана схема первой фазы после модуляции; точно такой же вид, только со сдвигами последовательно на 1/3 окружности, имеют схемы фаз 2 и 3, между тем как до модуляции схемы были различны.

В нижней части рис. 7.14 представлены графики МДС модулированной обмотки; хотя они и уступают графикам нормальных обмоток, но все же достаточно удовлетворительны. Следует обратить внимание на то, что здесь направление вращения поля сохраняется неизменным.

При помощи несколько громоздких тригонометрических выводов можно показать, что для модулирования следует разделить каждую фазу на число частей, равное разности между числителем и знаменателем отношения чисел пар полюсов, и выполнять модуляцию внутри каждой части отдельно; однако из них не вытекает, как именно следует подразделять каждую фазу для получения наилучшего результата, и потому приводить их здесь излишне. В настоящее время пока отсутствуют достаточно разработанные правила построения схем соединений и в значительной степени остается необходимым производить его путем последовательного подбора оптимального варианта, что требует значительной затраты труда и мало поддается формализации для ее выполнения средствами вычислительной техники.

Переключение чисел пар полюсов первоначально применялось только в асинхронных двигателях; однако в сравнительно недавнее время оно нашло применение также и в синхронных машинах для так называемых гидроаккумулирующих электростанций. Агрегаты этих станций в периоды минимумов потребления электроэнергии должны перекачивать воду из нижнего бьефа станции в верхний, для чего турбина превращается в насос, а генератор — в двигатель. Эта операция помимо изменения направления вращения требует иногда также изменения частоты вращения для получения оптимального режима работы гидравлической части агрегата, для чего нужно изменение числа пар полюсов обмоток и якоря и индуктора.

Первое производится полюсной или фазной модуляцией, а для второго нужно изменить число пар полюсов поля индуктора при

неизменном числе реальных полюсов. Средствами для этого служат изменение направления тока возбуждения в части полюсов и вывод некоторых полюсов из действия, что, в свою очередь, может быть сделано двумя способами — либо отключением их обмоток, либо подразделением катушек на две равные части, включаемые встречно. Последнее имеет то преимущество, что при нем не изменяется сопротивление цепи возбуждения.

Изменение числа пар полюсов поля индуктора может производиться при неподвижной машине посредством переключающего устройства, устанавливаемого на самом индукторе, но может выполняться и без него, если индуктор имеет четыре контактных кольца, что освобождает от необходимости проникновения внутрь машины.

Число реверсируемых полюсов должно быть четным, потому что в противном случае может возникать одностороннее магнитное тяжение индуктора, вызывающее его вибрацию. Кроме того, по той же причине стыки реверсируемых и нереверсируемых участков должны быть равномерно распределены по окружности индуктора; в частности, если обмотка разделяется на две части, то они должны быть одинаковы.

Пусть, например, требуется изменять число пар полюсов в отношении 3 : 4. Основным режимом агрегата является генераторный; в нем обмотки якоря и индуктора должны находиться в нормальных соединениях. В режиме двигателя частота вращения может потребоваться большей, следовательно, число пар полюсов будет меньшим. В данном случае в основном режиме генератора $2p = 8$ и обмотка индуктора может быть разделена на две равные части с четным числом полюсов в каждой.

В первой строке следующей схемы выписаны полярности полюсов индуктора в режиме генератора, а реверсируемая часть подчеркнута; во второй строке показан результат реверсирования, а в третьей — полярности поля, которые требуются после реверсирования:

С Ю С Ю С Ю С Ю (С)
С Ю Ю С Ю С С Ю (С)
С Ю С Ю С Ю (С)

В реверсированной обмотке третий слева полюс (Ю) и седьмой (С) оказались в таких местах, где находятся нейтральные зоны преобразованного поля; от них мало пользы, и их целесообразно вывести из работы одним из указанных выше способов.

Ближайшим соотношением чисел пар полюсов является 4 : 5; но при нем большее число пар полюсов нечетно, и потому непосредственно оно не подходит, однако изменение станет возможным, если числа пар полюсов будут умножены на любое четное число, что даст возможность реверсировать четное число полюсов.

Далее следует отношение 5 : 6, непосредственно пригодное для реверсирования:

С Ю С Ю С Ю С Ю С Ю С Ю (С)
С Ю С С Ю С Ю С Ю Ю С Ю (С)
С Ю С Ю С Ю С Ю С Ю (С)

На этот раз получилось достаточно удовлетворительное совпадение полярностей полюсов индуктора и требуемого преобразованного поля, только в двух местах одному полюсному делению поля противостоят по два полюса, что может быть допущено.

Стоит рассмотреть в заключение соотношение чисел пар полюсов 6 : 8; здесь реверсирование должно быть произведено в 8 — 6 = 2 местах поровну:

С Ю С Ю С Ю С Ю С Ю С Ю С Ю С Ю (С)
С Ю С С Ю С Ю Ю С Ю С С Ю С Ю Ю (С)
С Ю С Ю С Ю С Ю С Ю С Ю (С)

7.4. ОБМОТКИ С УВЕЛИЧЕННЫМ ЧИСЛОМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЕТВЕЙ ПРИ ЦЕЛЫХ ЧИСЛАХ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ

Выше неоднократно упоминалось, что наибольшее число параллельных ветвей, которое может иметь обмотка с целым числом пазов на полюс и фазу, для двухслойных обмоток и однослойных равносекционных обмоток с четными числами пазов на полюс и фазу равно числу их полюсов и только для однослойных обмоток с нечетными числами пазов на полюс и фазу равно числу пар полюсов, т. е. вдвое меньше.

Однако в некоторых случаях такие числа параллельных ветвей недостаточны; это особенно характерно для крупных синхронных машин с малыми числами пар полюсов, главным образом турбогенераторов больших мощностей. ЭДС в каждом проводнике обмотки якоря таких машин достигает многих сотен вольт, и при заданном значении номинального напряжения иногда не удается осуществить обмотку якоря даже при наибольшем указанном числе параллельных ветвей.

Условиями образования параллельных ветвей, обеспечивающими отсутствие уравнительных токов между ними (разумеется, при вполне симметричной сборке машины), является одинаковое число последовательно включенных проводников в каждой ветви и одинаковость их расположения во внешнем магнитном поле. При увеличении числа параллельных ветвей сверх указанного выше такие требования уже нельзя предъявлять; поэтому ЭДС в отдельных ветвях могут различаться либо по фазе, либо по амплитуде, либо и по тому и по другому. В результате неизбежно возникновение уравнительных токов между ветвями, и вопрос будет сводиться к тому, насколько допустимыми можно считать обусловленные ими добавочные потери в обмотке.

Если ЭДС параллельных ветвей неодинаковы по амплитуде, но совпадают по фазе, т. е. эти ветви *синфазны*, что бывает в тех случаях, когда их распределения по пазам симметричны относительно некоторой оси, то разность ЭДС ветвей равна арифметической разности этих ЭДС ΔE, а уравнительный ток между ними определяется так называемым *сквозным* индуктивным сопротивлением обмотки якоря X_c, более подробное рассмотрение которого выходит за пределы данной книги:

$$\Delta I = \Delta E/(4X_c). \qquad (7.3)$$

Этот ток, будучи почти чисто реактивным, отстает от ΔE на 1/4 периода. Каково будет его суммирование с основным током обмотки I, будет зависеть от сдвига последнего по отношению к ЭДС фазы; но независимо от этого сдвига обусловленное им относительное увеличение потерь в обмотке составит

$$\Delta P/P_{\text{м}} = (2\Delta I/I)^2, \qquad (7.4)$$

где $P_{\text{м}}$ — основные потери в меди.

Если параллельные ветви не синфазны, но расположены с некоторыми относительными сдвигами по окружности якоря, то в наиболее простом случае, когда ЭДС этих ветвей попарно отклоняются от их равнодействующей на некоторый угол δ, разность ЭДС ветвей будет являться их геометрической разностью и ее относительное значение

$$\Delta E = 2E \sin \delta, \qquad (7.5)$$

а обусловленный ею уравнительный ток между ветвями может быть определен по формуле (7.3). Это позволяет считать, что синфазные и несинфазные обмотки с одинаковыми по амплитуде разностями ЭДС параллельных ветвей практически равноценны; поэтому выбор между ними будет определяться бóльшим или меньшим удобством выполнения, в частности меньшим числом ненормальных деталей — особых форм лобовых частей обмотки с бóльшим или меньшим вылетом или специальных хомутиков для их соединений в головках, а тем более обходных перемычек. Однако получение хороших результатов вовсе без применения ненормальных деталей возможно лишь в редких случаях.

Еще в начале текущего столетия на всемирной выставке в Париже экспонировался двухполюсный турбогенератор с четырьмя несинфазными параллельными ветвями однослойной обмотки якоря (рис. 7.15). Каждая ветвь состояла из двух концентрических секций, стороны которых смещены за счет перекрещивания в лобовых частях; выводы располагались по разные стороны машины. Если применить способ проекций векторов ЭДС всех пазов на две взаимно перпендикулярные оси, то окажется, что они попарно отклоняются в противоположные стороны от среднего направления на угол $\delta = 7' 57''$, следовательно, их разность

составляет лишь

$$\Delta E/E = 2\sin 7'57'' = 2\cdot 0{,}00231 = 0{,}00462.$$

Добавочные потери, вызываемые такой разностью ЭДС, ничтожны, но подобные обмотки не получили практического применения, потому что необходимость в них в те годы еще не назрела, а выполнение перекрещивания в лобовых частях представляет определенные трудности.

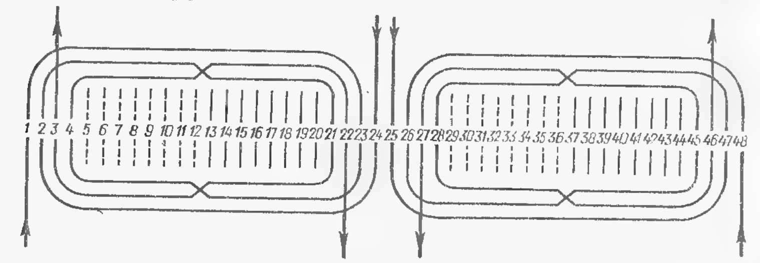


Рис. 7.15. Двухполюсная концентрическая обмотка с четырьмя параллельными ветвями

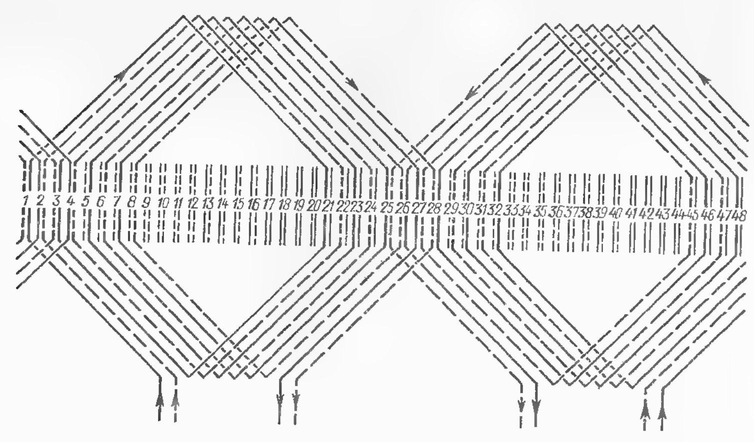


Рис. 7.16. Двухполюсная обмотка с четырьмя параллельными ветвями и подразделением через одну секцию

При двухслойной обмотке с любым четным числом пазов на полюс и фазу простейшим способом удвоения числа параллельных ветвей является подразделение существующих параллельных ветвей через одну секцию, как показано на рис. 7.16 для случая $q = 8$. Разность фаз между полученными таким способом параллельными ветвями соответствует зубцовому делению и убывает по мере увеличения q, но все же остается слишком большой:

Число пазов q	6	8	10	12
Сдвиг ЭДС δ	5° 00′	3° 45′	3° 00′	2° 30′
$\sin \delta$	0,0872	0,0654	0,0523	0,0436
$\Delta E/E$	0,1744	0,1306	0,1046	0,0872

Хотя никаких конструктивных затруднений здесь не возникает, так как обмотки не требуют ненормальных деталей, такие значения ΔE неприемлемы; в настоящее время считается, что относительная разность ЭДС не должна превосходить 1 %, между тем как здесь она более чем на порядок выше.

Число способов подразделения обмотки на несинфазные ветви возрастает с увеличением числа пазов на полюс и фазу — начиная с 4 при $q = 6$ оно затем удваивается при каждом следующем четном числе и составляет, таким образом, 8 при $q = 8$, 16 при $q = 10$ и 32 при $q = 12$, так что выбор представляется достаточно обширным.

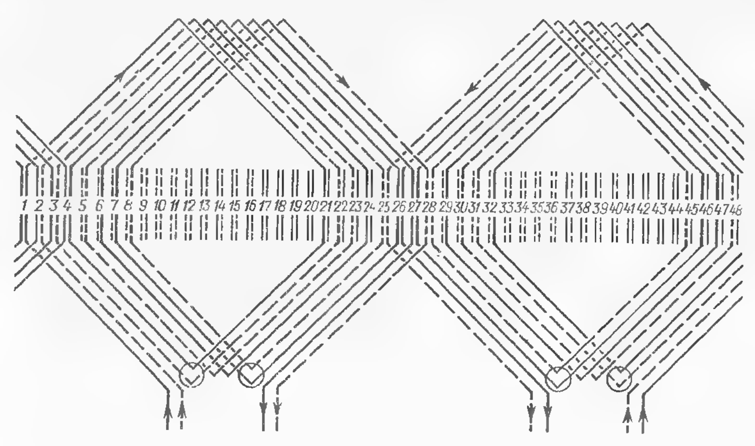


Рис. 7.17. Двухполюсная обмотка с четырьмя параллельными ветвями и улучшенным подразделением

При $q = 6$ лучшим вариантом распределения является следующий:

Первое полюсное деление: 1 2 2 1 1 2
Второе полюсное деление: 3 4 4 3 3 4

Оно дает $\delta = 1° 31' 50''$, чему соответствует разность ЭДС $\Delta E/E = 0{,}0534$; хотя это и втрое меньше, чем при чередовании секций через одну, но все же слишком велико. Впрочем, вероятность необходимости удвоения числа параллельных ветвей при этом числе q еще ничтожна.

При $q = 8$ наилучшим из восьми возможных вариантов является распределение (рис. 7.17):

Первое полюсное деление: 1 2 2 1 2 1 1 2
Второе полюсное деление: 3 4 4 3 4 3 3 4

Здесь отклонение $\delta = 7' 57''$, т. е. такое же, как и для упомянутой однослойной обмотки на рис. 7.15; сопоставление обоих этих рисунков показывает, что распределение сторон секций в них одинаково, а укорочение шага, принятое для двухслойной

обмотки, нисколько ему не препятствует. Однако недостатком такого варианта является необходимость перекрещивания лобовых частей в двух местах в каждой фазе и на каждом полюсном делении, отмеченных на схеме кружками.

Если теперь сделать перекрещивания в трех местах, как показано на рис. 7.18, то распределение примет вид

Первое полюсное деление: 1 2 2 1 1 2 2 1
Второе полюсное деление: 3 4 4 3 3 4 4 3

и обмотка превращается в синфазную с разностью $\Delta E/E = 0{,}0173$; это почти в четыре раза больше, чем для предыдущего варианта, но зато устройство лобовых частей со стороны выводов становится однородным, что тоже может являться немаловажным фактором.

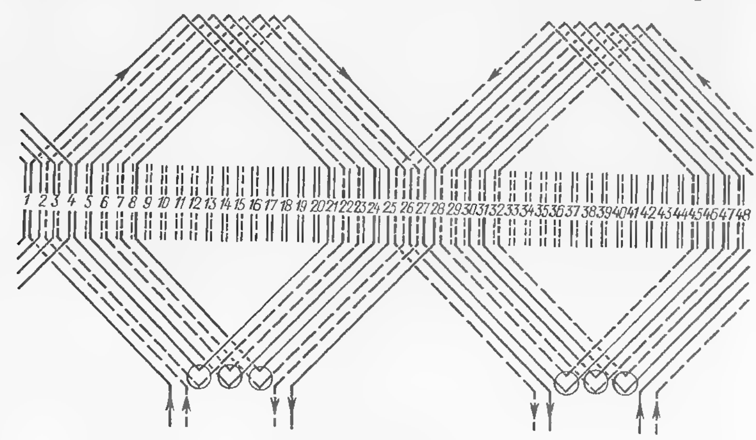


Рис. 7.18. Двухполюсная обмотка с четырьмя синфазными параллельными ветвями

Из 16 возможных вариантов распределения при следующем четном числе пазов на полюс и фазу $q = 10$ наименьшие отклонения имеют следующие два варианта:

Первое полюсное деление: 1 2 2 1 1 2 2 1 1 2
Второе полюсное деление: 3 4 4 3 3 4 4 3 3 4

со значением отклонения $\delta = 32' 48''$, чему соответствует $\Delta E/E = 0{,}0099$, по устройству лобовых частей похожий на рис. 7.18, т. е. с перекрещиванием во всех головках, и

Первое полюсное деление: 1 2 2 1 2 1 2 1 1 2
Второе полюсное деление: 3 4 4 3 4 3 4 3 3 4,

имеющий отклонение $\delta = 42' 32''$ или же $\Delta E/E = 0{,}0124$, т. е. тоже относительно неплохой результат, однако с менее однородным устройством лобовых частей, что можно рассматривать как некоторый недостаток. Поскольку данное число пазов на полюс и фазу не кратно четырем, синфазные ветви при нем невозможны.

При $q = 12$ могут существовать 32 варианта несинфазных и 10 вариантов синфазных обмоток; из первых особо выделяется следующий:

Первое полюсное деление: 1 2 1 2 2 2 1 1 1 2 1 2
Второе полюсное деление: 3 4 3 4 4 4 3 3 3 4 3 4,

дающий $\delta = 6' 30''$ и соответственно $\Delta E/E = 0{,}00189$; однако данное распределение требует уже не перекрещивания головок, а применения обходных перемычек, что еще более осложняет устройство лобовых частей. Ему лишь незначительно уступает вариант синфазного распределения, не требующий больших обходов:

Первое полюсное деление: 1 2 2 1 2 1 1 2 1 2 2 1
Второе полюсное деление: 3 4 4 3 4 3 3 4 3 4 4 3,

он дает $\Delta E/E = 0{,}00233$; это ненамного больше предыдущего, но такое распределение тоже не отличается однородностью устройства лобовых частей. Последняя может быть достигнута при распределении, подобном рис. 7.18:

Первое полюсное деление: 1 2 2 1 2 1 1 2 1 2 2 1
Второе полюсное деление: 3 4 4 3 4 3 3 4 3 4 4 3,

для которого $\Delta E/E = 0{,}00764$ — тоже очень неплохой результат.

При конструктивном выполнении обмоток с четырьмя параллельными ветвями, как синфазных, так и несинфазных, может оказаться целесообразным расположение выводов ветвей нечетной нумерации по одну сторону машины, а четной нумерации — по другую (как это было применено в обмотке по рис. 7.15); однако это влечет за собой удвоение числа разновидностей стержней, так как для каждого слоя они должны при этом иметь отгиб лобовых частей и вправо и влево. Тем не менее, известны случаи применения такого расположения выводов, несмотря на связанные с этим неудобства, при реальном осуществлении обмоток с четырьмя параллельными ветвями.

Коэффициенты распределения для разных пар параллельных ветвей одинаковы при несинфазных вариантах и различны при синфазных; ввиду разнообразия распределений нет возможности дать общие правила вычисления этих коэффициентов, которое можно производить только методом проекций векторов ЭДС отдельных пазов на две взаимно перпендикулярные оси. При этом следует иметь в виду, что число секций в каждой ветви равно половине числа пазов на полюс и фазу (как и при образовании обмотки шестифазного тока из обмотки трехфазного тока). Однако воспользоваться готовыми значениями коэффициентов по таблицам удается только в отдельных случаях, и то главным образом для малоудовлетворительных вариантов распределения.

Следует иметь в виду, что для синфазных обмоток все параллельные ветви симметричны относительно середины фазы, между

тем как для несинфазных обмоток только в редких случаях можно найти оси, относительно которых распределения симметричны, и потому коэффициенты распределения таких обмоток для гармонических четных порядков отличны от нуля. При этом в ветвях четной нумерации асимметрия направлена в одну сторону, а в ветвях нечетной — в другую, и потому между ветвями четной и нечетной нумерации разных полюсных делений могут существовать уравнительные токи, определяемые гармоническими ЭДС четных порядков, и не только при нагрузке, но и при холостом ходе.

Нахождение распределения с наименьшим значением относительной разности ЭДС связано с довольно громоздкой операцией суммирования проекций векторов ЭДС отдельных пазов на две взаимно перпендикулярные оси; при большом числе возможных вариантов распределения выполнение этой операции без помощи вычислительной техники было бы обременительно. Однако посредством несложного приема можно не только выявить наилучший вариант, но и расположить все возможные варианты в порядке нарастания относительной разности ЭДС; тогда останется только выполнить суммирование проекций векторов для отобранного варианта.

Этот прием основан на том, что синусы малых углов в довольно широких пределах пропорциональны самим этим углам (а именно составляют 0,000291 на одну минуту). Поэтому, если просуммировать расстояния пазов от середины фазы порознь для ветвей четной и нечетной нумерации, то чем ближе между собой будут эти суммы, тем меньше и разность ЭДС ветвей. Иными словами, этим как бы определяется условие равновесия стержня, опертого в своей середине и нагруженного системой одинаковых грузов, распределенных по стержню по одну сторону от точки опоры в соответствии с пазами первой пары ветвей, а по другую сторону — второй пары. Разумеется, все это проделывается для одного слоя обмотки. Так, например, для упомянутого выше наилучшего варианта распределения несинфазных ветвей при $q = 12$ сумма расстояний по одну сторону от середины фазы равна $3{,}5 + 5{,}5 = 9$ и по другую сторону $0{,}5 + 1{,}5 + 2{,}5 + 4{,}5 = 9$.

Три параллельные ветви в двухполюсной обмотке при целых числах пазов на полюс и фазу возможны только, когда эти числа кратны трем. Эти ветви могут быть как синфазными, так и несинфазными; но во всех случаях одна ветвь располагается симметрично относительно оси фазы, и ей здесь приписывается четная нумерация, а двум другим — нечетная. Эти последние при несинфазных вариантах распределения являются взаимными зеркальными отображениями, и потому их ЭДС одинаковы по амплитуде и отличаются от ЭДС ветви четной нумерации по фазе на одинаковые углы; как правило, амплитуда этой последней несколько больше. При синфазных вариантах распределения амплитуды ЭДС ветвей различны, но совпадают по фазе, потому что распределения ветвей нечетной нумерации также симметричны относительно оси

фазы. Однако любые несинфазные распределения могут быть превращены в синфазные, если на разных полюсных делениях они являются взаимными зеркальными отображениями.

Первое число пазов на полюс и фазу, кратное трем, $q = 6$ еще слишком мало для применения в крупных двухполюсных машинах, но достаточно, чтобы сделать необходимые общие выводы. При нем распределение секций по параллельным ветвям на каждом полюсном делении может быть сделано тремя парами способов, которые можно характеризовать так: в первой паре секции ветви 2 расположены рядом, во второй паре между ними помещено по одной секции ветвей 1 и 3 и в третьей паре секции ветви 2 отнесены на края участка, занимаемого данной фазой:

1. 1 1 2 2 3 3	3. 1 2 1 3 2 3	5. 2 1 1 3 3 2
2. 1 3 2 2 1 3	4. 1 2 3 1 2 3	6. 2 1 3 1 3 2

Кроме того, возможен еще один вариант, в котором все ветви синфазны на каждом полюсном делении:

7. 1 2 3 3 2 1

Здесь различие между ветвями четной и нечетной нумерации стирается.

Для того чтобы обмотка не требовала применения ненормальных деталей, достаточно, чтобы структура всех трех ветвей на каждом полюсном делении была одинаковой; тогда и ЭДС всех трех ветвей будут иметь одинаковую амплитуду. Этому требованию удовлетворяют варианты 1 и 4 на рис. 7.19; в первом из них (рис. 7.19, *а*) секции каждой ветви располагаются рядом, а во втором (рис. 7.19, *б*) — поочередно в одном и том же порядке. Однако равенство амплитуд ЭДС ветвей еще недостаточно для того, чтобы между ветвями не было уравнительных токов: эти ЭДС не совпадают по фазе. В варианте 1 сдвиг между соседними ветвями достигает 1/3 числа зубцовых делений, занимаемых одним слоем каждой фазы обмотки; в данном случае таких делений два, а так как каждому из них соответствует 10°, то сдвиг между ветвями равен 20°. При увеличении числа пазов на полюс и фазу каждому зубцовому делению будет соответствовать меньший угол, но зато число таких углов будет возрастать и сдвиг между ветвями сохранит значение 20°.

Напротив, в варианте 4 сдвиг между соседними ветвями всегда равен одному зубцовому делению и с увеличением числа пазов на полюс и фазу будет соответственно уменьшаться. Отсюда ясно, что предпочтение следует отдать обмоткам, построенным аналогично варианту 4, т. е. с поочередным чередованием секций всех ветвей. Если порядок этого чередования на разных полюсных делениях сделать противоположным, а к этому нет никаких препятствий, то ветви станут синфазными и отношение амплитуд крайних ветвей 1 и 3 к амплитуде средней ветви 2 будет равно косинусу угла сдвига δ, соответствующего одному зубцовому

делению. Среднее значение ЭДС ветвей может быть принято равным

$$E_{ср} = (E_2 + 2E_{1,3})/3 = E_2\,(1 + 2\cos\delta)/3. \qquad (7.6)$$

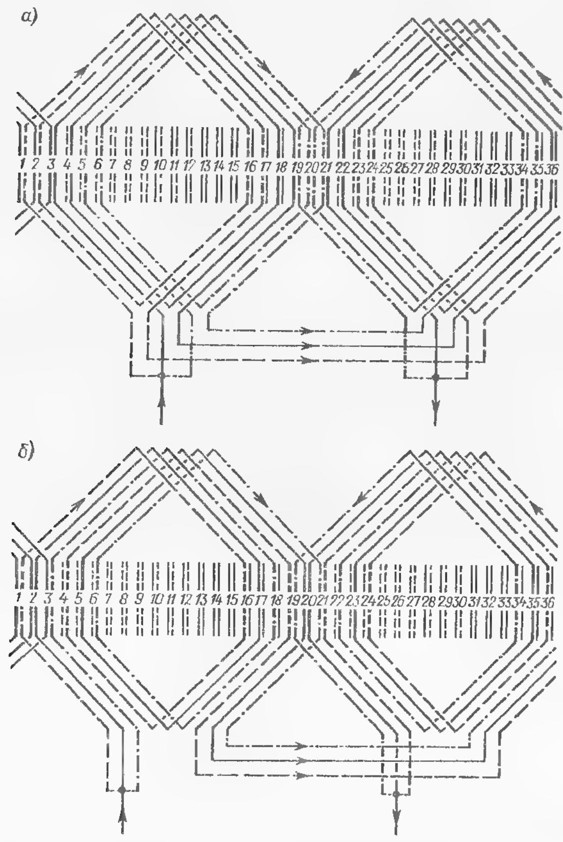


Рис. 7.19. Двухполюсная обмотка с тремя параллельными ветвями в двух вариантах распределения секций

К этому среднему значению следует отнести разность между ЭДС ветвей ΔE; а относительное значение ЭДС ветви 2 следует принять равным ее коэффицинту распределения k_{q1}:

$$\frac{\Delta E}{E_{ср}} = \frac{3\,(1 - \cos\delta)}{k_{q1}\,(1 + 2\cos\delta)}. \qquad (7.7)$$

Обмотки, построенные соответственно варианту 4, имеют следующие основные данные:

Число пазов на полюс и фазу q	6	9	12
Число пазов на одну ветвь $q/3$	2	3	4
Коэффициент распределения k_{q1}	0,9659	0,9598	0,9577
Угол сдвига ветвей δ	10°	6° 40′	5°
$\cos\delta$	0,9848	0,9932	0,9962
$k_{q1}\cos\delta$	0,9513	0,9533	0,9540
Разность $k_{q1}\,(1 - \cos\delta)$	0,0146	0,0065	0,0037
Относительная разность $\Delta E/E_{ср}$	0,0153	0,0068	0,0038

Если бы на разных полюсных делениях не было применено противоположное чередование секций, принадлежащих разным ветвям, то значения ΔE были бы на уровне указанных в начале данного параграфа для двухполюсных обмоток с четырьмя параллельными ветвями и чередованием секций через одну.

При синфазном варианте 7 тоже может быть применено чередование секций на разных полюсных делениях в обратном порядке:

3 2 1 1 2 3

В результате ЭДС ветвей 1 и 3 станут равными, в электрическом отношении вариант 7 не будет отличаться от варианта 4 и относительная разность ЭДС будет той же, т. е. 0,0153; таким образом, этот вариант не даст никаких преимуществ, но в отношении исполнения значительно уступит варианту 4, так как имеет различные вылеты лобовых частей.

Следует отметить, что среди возможных вариантов распределения, число которых при $q = 9$ доходит до 16, а при $q = 12$ даже до 120, можно найти обладающие еще лучшими электрическими показателями, чем у приведенных выше; но все они отличаются большей сложностью устройства обмоток, требуют применения либо ненормальных хомутиков, либо даже обходных перемычек, и потому выбор варианта должен производиться в зависимости от особенностей каждого случая.

В четырехполюсных машинах возможно получение четырех параллельных ветвей не только в двухслойных обмотках, но и в однослойных с четными числами пазов на полюс и фазу. Три параллельные ветви можно было бы получить удвоением описанных выше двухполюсных обмоток с тремя параллельными ветвями, но это привело бы к загромождению торца машины междуполюсными соединениями — по три на фазу на каждой паре полюсных делений, т. е. всего 6, и еще по три между парами полюсных делений, итого 27.

Однако получение трех параллельных ветвей при q, кратном трем, возможно и другим способом, значительно сокращающим число перемычек. Именно, группы секций данной фазы на трех полюсных делениях принимаются за основу трех параллельных ветвей, а к каждой из них добавляется по 1/3 секций из группы на четвертом полюсном делении, как показано на рис. 7.20. В зависимости от способа подразделения этой группы могут получаться различные результаты; в частности, если число пазов на полюс и фазу четно, например $q = 6$, то подразделение по способу

1 2 3 3 2 1

даст синфазные ветви, но с различными амплитудами ЭДС; если же принять подразделение в порядке

1 2 3 1 2 3,

то ветви 1 и 3 будут иметь ненамного меньшую амплитуду ЭДС, чем ветвь 2, но отклонятся от нее на одинаковые углы в противоположные стороны, как это представлено в сильно преувеличенном виде на рис. 7.21: к одинаковой основе E прикладываются три также одинаковые по значению добавки δE из частей подразделенной группы четвертого полюсного деления, но в ветви

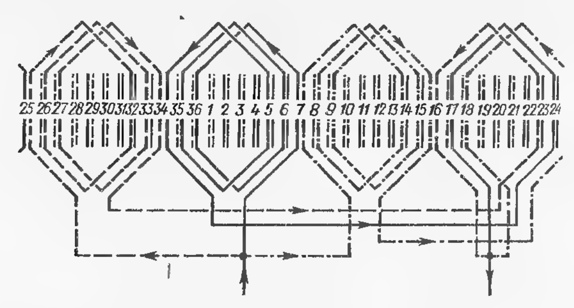


Рис. 7.20. Четырехполюсная обмотка с тремя параллельными ветвями

2 — синфазно с E, а в ветвях 1 и 3 — под углами α, соответствующими сдвигу на одно зубцовое деление. ЭДС E_1 и E_3 ветвей 1 и 3 могут быть вычислены решением треугольников, построенных на основе E и добавках δE с углом между ними, равным $180° - \alpha$, а разности ЭДС между ветвями 1 и 3 и ветвью 2 — решением равнобедренного треугольника с двумя сторонами δE и углом между ними, равным α.

Единственным реально возможным четным числом пазов на полюс и фазу для четырехполюсных машин является $q = 6$, так как следующее четное и кратное трем число $q = 12$ маловероятно встретить. При синфазном соединении ЭДС ветви 1, в состав которой вошли две крайние секции подразделенной группы, меньше ЭДС ветви 2 на 0,0156, а ЭДС ветви 3 с двумя внутренними секциями подразделенной группы больше, чем в ветви 2, на 0,0079; в среднем это дает 0,0117, что можно считать пределом приемлемого. Недостатком этого варианта является необходимость применения ненормальных соединений между секциями подразделяемой группы — одно из них в обход трех, а другое даже пяти головок.

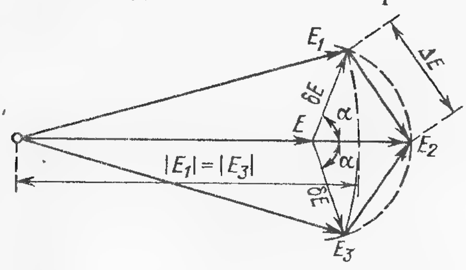


Рис. 7.21. Диаграмма ЭДС несинфазных ветвей

Несинфазное соединение при этом числе пазов на полюс и фазу дает разность амплитуд ЭДС ветви 2 и ветвей 1 и 3 всего лишь 0,0028, что было бы отлично, но отклонения векторов ЭДС этих ветвей от среднего направления приводят к тому, что разности ЭДС достигают 0,0429; зато головки всех секций подразделяемой группы одинаковы. Правда, их вылет несколько меньше, чем у секций прочих групп, что заставит либо иметь для них особый шаблон стержней, либо применить фигурные хомутики.

Следующее число пазов на полюс и фазу, кратное трем, $q = 9$ еще может встречаться в крупных четырехполюсных машинах; синфазное соединение при нем невозможно, а несинфазное дает разность амплитуд ЭДС всего лишь 0,0013, но разность ЭДС между ветвями достигает 0,0292. Таким образом, в целом применение трех параллельных ветвей для четырехполюсных машин дает значительно худшие результаты, чем для двухполюсных, и его лучше избегать.

7.5. ОБМОТКИ С УВЕЛИЧЕННЫМ ЧИСЛОМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЕТВЕЙ ПРИ ДРОБНЫХ ЧИСЛАХ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ

Условием выполнимости обмотки с произвольным числом пазов на полюс и фазу и заданным числом параллельных ветвей a является делимость числа секций каждой фазы $2pq$ на это число a независимо от того, является q целым или дробным; в последнем случае необходимо, чтобы числитель неправильной дроби $bd + c$ делился на a, поскольку в случае делимости $2p$ на a такое число ветвей выполняется беспрепятственно.

Двухполюсные обмотки, для которых особенно важна возможность выполнения с увеличенным числом параллельных ветвей, могут иметь только одно значение знаменателя $d = 2$; в таких обмотках нельзя получить две параллельные ветви, потому что общее число секций в фазе нечетно, но при указанном выше условии можно иметь три ветви. Это условие дает числа пазов на полюс и фазу $q = 1^1/_2$; $4^1/_2$; $7^1/_2$; $10^1/_2$ ..., чему соответствуют полные числа пазов $Z = 9$; 27; 45; 63 ... Разумеется, первые два из них слишком малы для крупных двухполюсных машин, но они пригодны для рассмотрения вопроса об устройстве обмоток. Следует отметить, что нечетные общие числа пазов Z применяются вообще неохотно, так как они создают неудобства в общей конструкции машины, в частности сердечника якоря; тем не менее, примеры этого существуют.

Одна группа секций каждой фазы будет содержать при этом b секций, а другая — на единицу больше, т. е. $b + 1$; но ни то, ни другое не может быть кратно трем, и потому ни одну из групп нельзя разделить на три равные части. Число способов возможного подразделения групп и соединения частей между собой быстро возрастает с увеличением числа пазов на полюс и фазу; но, как и при целых числах пазов, интерес представляют те, для которых не возникает дополнительных затруднений при выполне-

нии обмотки — с подразделениями групп между ветвями подряд и поочередно. Если в обеих группах каждой фазы применен один и тот же способ, то все секции будут одинаковыми и все соединительные детали — нормальными.

Как и при целых числах q, такому условию удовлетворяют два способа чередования секций, принадлежащих разным ветвям: подряд и поочередно. Разумеется, что на обоих полюсных делениях должен быть применен один и тот же способ.

Наименьшим числом пазов на полюс и фазу, при котором можно рассмотреть основные свойства разных способов распределения, является $q = 4^1/_2$; при нем возможны следующие три варианта:

Первое полюсное деление

1. 1 1 2 3 3
2. 1 3 2 1 3
3. 1 2 2 2 3

Второе полюсное деление

1. 3 2 2 1
2. 2 1 3 2
3. 3 3 1 1

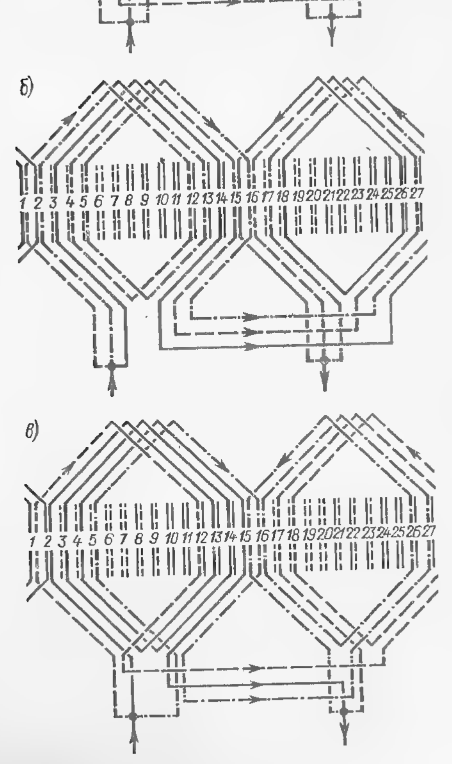


Рис. 7.22. Двухполюсная обмотка с дробным числом пазов на полюс и фазу и тремя параллельными ветвями

На рис. 7.22 представлены все три варианта распределения; из него видно, что особенной простотой отличается вариант 2 (рис. 7.22, *б*), а спецификой варианта 3 (рис. 7.22, *в*) является отсутствие секций ветви 2 на одном из полюсных делений. Можно показать, что и в электрическом отношении вариант 2 является наилучшим; это имеет смысл потому, что и все прочие обмотки с тремя параллельными ветвями при дробных числах пазов на полюс и фазу могут быть исследованы подобным же образом.

Коэффициент распределения ветви 2 при отсчете угловых положений от середины полюсного деления равен

$$k_q = (1 + 2\cos 3\alpha/2)/3 = (1 + 2\cos 20°)/3 = (1 + 2 \times \times 0{,}9397)/3 = 0{,}9598;$$

коэффициенты распределения ветвей 1 и 3 могут быть получены суммированием косинусов и синусов углов, определяющих положения сторон секций при таком же способе отсчета:

$$(\cos\alpha/2 + \cos\alpha + \cos 2\alpha)/3 = (\cos 6°\,40' + \cos 13°\,20' + \cos 26°\,40')/3 = (0{,}9932 + 0{,}9730 + 0{,}8936)/3 = 0{,}9533;$$

$$(\sin 26°\,40' - \sin 13°\,20' - \sin 6°\,40')/3 = (0{,}4488 - 0{,}2306 - 0{,}1161)/3 = 0{,}03403.$$

Частное от деления суммы синусов на сумму косинусов является тангенсом угла δ между векторами ЭДС ветви 2 и ветвей 1 и 3:

$$\operatorname{tg}\delta = 0{,}03403/0{,}9533 = 0{,}0357;$$
$$\delta = 2°\,02'\,40''; \quad \cos\delta = 0{,}9994.$$

ЭДС ветвей 1 и 3 может быть найдена из прямоугольного треугольника, построенного на суммах косинусов и синусов:

$$E_{1,3} = \sqrt{(0{,}9598)^2 + (0{,}03403)^2} = \sqrt{0{,}90994} = 0{,}9539.$$

Среднее значение ЭДС всех трех ветвей

$$E_{\text{ср}} = (0{,}9598 + 2\cdot 0{,}9539)/3 = 0{,}9559.$$

Отсюда разность ЭДС ветви 2 и ветвей 1 и 3 как третья сторона треугольника с углом δ, построенного на векторах этих ЭДС, пропорциональна значению

$$\Delta E = \sqrt{(0{,}9598)^2 + (0{,}9539)^2 - 2\cdot 0{,}9598\cdot 0{,}9539\cdot 0{,}9994} = \sqrt{0{,}001199} = 0{,}03463.$$

Таким образом,

$$\Delta E/E_{\text{ср}} = 0{,}03463/0{,}9559 = 0{,}03623.$$

Такое значение в реальной обмотке было бы чрезмерным, но число пазов на полюс и фазу $q = 4^1/_2$ было принято только для упрощенного примера, а применение в обмотках крупных двухполюсных машин могут иметь только числа $q = 7^1/_2$ и $10^1/_2$; показатели этих обмоток, вычисленные подобным же образом, имеют следующие значения:

	$4^1/_2$	$7^1/_2$	$10^1/_2$
Число пазов на полюс и фазу q . . .	$4^1/_2$	$7^1/_2$	$10^1/_2$
Коэффициенты распределения:			
ветви 2	0,9598	0,9567	0,9558
ветвей 1 и 3	0,9539	0,9544	0,9547
среднее значение kq_1	0,9559	0,9552	0,9550
Угол сдвига ветвей δ	2° 02′ 40″	0° 43′ 46″	0° 22′ 16″
$\cos\delta$	0,9994	0,9999	~1,0000
$\Delta E/E_{ср}$	0,03623	0,01295	0,00660

Таким образом, при реальных значениях числа пазов на полюс и фазу вычисляемая величина принимает вполне приемлемые значения; однако необходимо отметить, что вследствие некоторой несимметричности распределения секций ветвей 1 и 3 относительно оси фазы их коэффициенты распределения для гармонических четных порядков отличны от нуля.

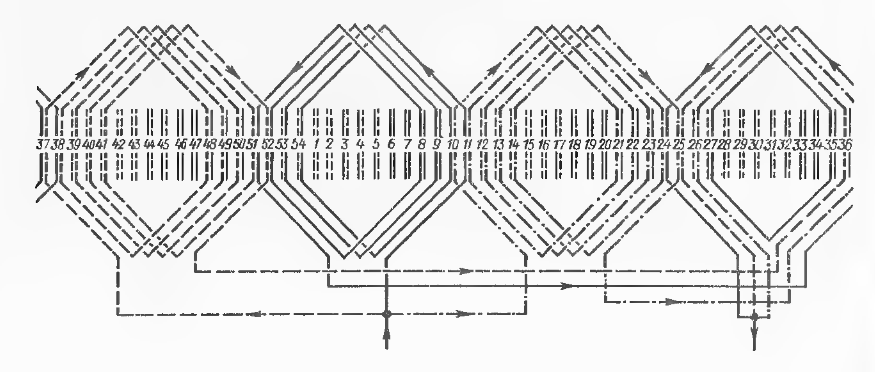


Рис. 7.23. Четырехполюсная обмотка с дробным числом пазов на полюс и фазу и тремя параллельными ветвями с разделением одной из меньших групп секций

Четырехполюсные обмотки с тремя параллельными ветвями могут быть получены удвоением двухполюсных с обратным чередованием параллельных ветвей на разных парах полюсных делений, в результате которого ЭДС всех трех ветвей станут практически синфазными из-за высоких значений косинуса угла сдвига между ними, и по этой же причине выравниваются их амплитуды. Для этих обмоток число пазов $q = 10^1/_2$ маловероятно, но зато вполне приемлемо число $q = 4^1/_2$. Однако недостатком таких обмоток является большая загруженность торца машины соединительными перемычками, число которых возрастает до девяти в каждой фазе.

От этого недостатка в значительной степени свободны четырехполюсные обмотки с тремя параллельными ветвями, получаемыми путем подразделения одной из четырех групп секций в каждой фазе на три части и присоединения таких частей к каждой из трех прочих групп. Однако здесь число секций в группах не может быть кратно трем и сами группы неодинаковы — они попарно различаются на одну секцию. Подразделять на три части можно любую группу — как из большего, так и из меньшего числа секций и затем присоединять эти неравные части к трем прочим группам так, чтобы число секций во всех трех ветвях было одинаковым.

На рис. 7.23 дан пример обмотки с $q = 4^1/_2$, у которой подразделена группа из четырех секций так, что одна часть состоит из двух секций, присоединенных ко второй группе из четырех секций, а две другие части содержат только по одной секции добавленной к одной из групп, состоящих из пяти секций.

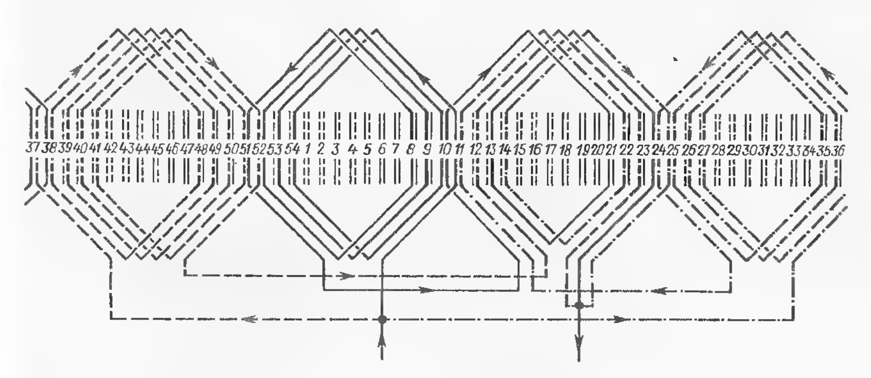


Рис. 7.24. Четырехполюсная обмотка с дробным числом пазов на полюс и фазу и тремя параллельными ветвями с разделением одной из бóльших групп секций

Далее на рис. 7.24 представлен другой способ подразделения— на этот раз группы из пяти секций; одна часть состоит только из одной секции, присоединенной к противоположно лежащей группе из пяти секций, а две другие части, содержащие по две секции, присоединены к группам из четырех секций. В обоих случаях секции одной и той же части располагаются через две одна от другой, т. е. в порядке 1 2 3 или 3 2 1:

Группа из 4 секций: 2 1 3 2
Группа из 5 секций: 3 1 2 3 1

Следующее число пазов $q = 7^1/_2$ при применении этого же принципа разделения групп на три части дает распределения:

Группа из 7 секций: 2 3 1 2 3 1 2
Группа из 8 секций: 3 1 2 3 1 2 3 1

Необходимо отметить, что вылет лобовых частей в пределах подразделяемой группы меньше, чем у всех остальных секций; это заставляет либо изготовлять их по особому шаблону, либо применять фигурные хомутики для их соединения, что следует отнести к недостаткам таких обмоток. Схемы соединения при любом числе пазов на полюс и фазу остаются одними и теми же; во всех случаях часть подразделяемой группы, относимая к противолежащей группе, синфазна с этой группой, но две остальные группы не синфазны с присоединяемыми к ним частями и их

симметричность по отношению к оси фазы нарушается, вследствие чего их коэффициенты распределения для гармонических четных порядков отличны от нуля.

Показатели обмоток этого вида, вычисленные по приведенному выше способу, имеют следующие значения:

Число пазов на полюс и фазу q	$4^1/_2$	$4^1/_2$	$7^1/_2$	$7^1/_2$
Число секций подразделяемой группы	4	5	7	8
Коэффициенты распределения:				
ветви 2	0,9575	0,9556	0,9557	0,9553
ветвей 1 и 3	0,9546	0,9561	0,9549	0,9552
среднее значение	0,9556	0,9559	0,9552	0,9552
Угол сдвига ветвей δ	1° 09′ 48″	2° 10′ 47″	0° 49′ 08″	1° 10′ 07″
$\cos \delta$	0,9998	0,9993	0,9999	0,9998
$\Delta E/E_{\text{ср}}$	0,02049	0,03803	0,01432	0,02064

Таким образом, обмотки данного типа не отличаются очень хорошими показателями; при этом несколько лучшими являются варианты с подразделением группы с меньшим числом секций. К недостаткам этих обмоток следует отнести также и то, что общие числа пазов у них хотя и четны, но малоупотребительны: $Z = 54$ и 90.

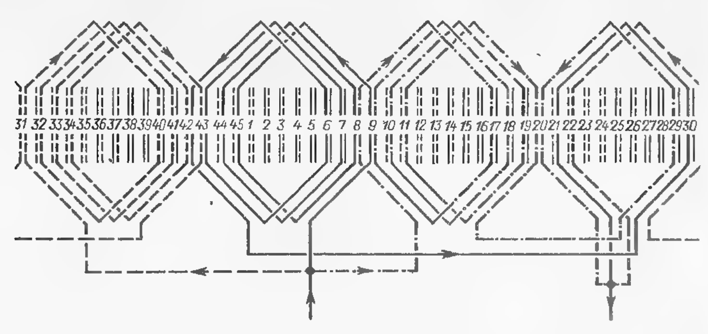


Рис. 7.25. Четырехполюсная обмотка с числом пазов на полюс и фазу $q = 3^3/_4$ и тремя параллельными ветвями с разделением группы из меньшего числа секций

Четырехполюсные обмотки возможны также при знаменателе дроби $d = 4$; условием выполнимости в них трех параллельных ветвей остается делимость на три числителя неправильной дроби $bd + c$, так как именно ему равно общее число секций в каждой фазе. Эти обмотки выполнимы при числах пазов на полюс и фазу $q = 2^1/_4$; $3^3/_4$; $5^1/_4$; $6^3/_4$; $8^1/_4$ ...; более высокие числа маловероятны. Здесь три группы состоят из одинакового числа секций, а в четвертой число секций отличается на единицу и кратно трем; естественно подразделять именно ее на три равные части. Характерным здесь является то, что группа секций, отличная от трех других, синфазна с противоположно лежащей группой, но две другие не синфазны ни с первыми двумя, ни между собой. В качестве примера на рис. 7.25 представлена обмотка с $q = 3^3/_4$, что вполне достаточно для уяснения свойств таких обмоток.

Однако возможно и другое решение: на три части, на этот раз неравные, подразделяется группа из большего числа секций, лежащая напротив группы из меньшего их числа; тогда к этой последней присоединяется часть, содержащая большее число секций, а две части с меньшим числом секций — к группам из большего числа секций, как показано на рис. 7.26.

Остается только решить, к какой группе из двух с одинаковыми числами секций следует присоединить ту или иную часть подразделенной группы. Это должно быть сделано так, чтобы по возможности приблизить эти группы к синфазности и к равенству ЭДС ветвей, хотя полностью ни то, ни другое не может быть выполнено. Этот вопрос может быть пояснен построением звезды векторов ЭДС всех секций, как это неоднократно выполнялось в главе пятой.

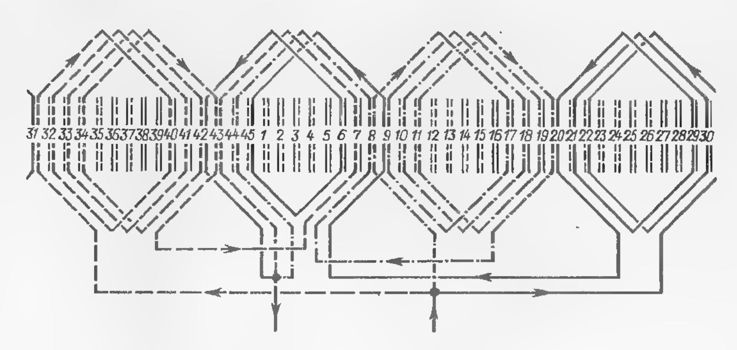


Рис. 7.26. Четырехполюсная обмотка с числом пазов на полюс и фазу $q = 3^3/_4$ и тремя параллельными ветвями с разделением одной из трех групп с бóльшим числом секций

Такая звезда представлена на рис. 7.27. При ее рассмотрении становится ясно, что к группе секций *10—11—12—13* должна быть добавлена секция *1*, а к группе *32—33—34—35*—секция *23*. Эти же самые два способа получения трех параллельных ветвей могут быть применены и при всех других перечисленных выше числах пазов на полюс и фазу. Основные показатели получаемых таким образом обмоток приведены ниже:

Число пазов на полюс и фазу q	$3^3/_4$	$5^1/_4$	$6^3/_4$	$8^1/_4$
Число секций подразделяемой группы	3	5	6	8
Коэффициенты распределения:				
ветви 2	0,9615	0,9511	0,9571	0,9535
ветвей 1 и 3	0,9519	0,9570	0,9539	0,9557
среднее значение	0,9551	0,9550	0,9550	0,9550
Угол сдвига ветвей δ	0° 07′ 15″	0° 26′ 09″	0° 16′ 53″	0° 20′ 17″
$\Delta E/E_{\text{ср}}$	0,01026	0,00982	0,00590	0,00630

Таким образом, все эти обмотки имеют практически вполне приемлемые показатели.

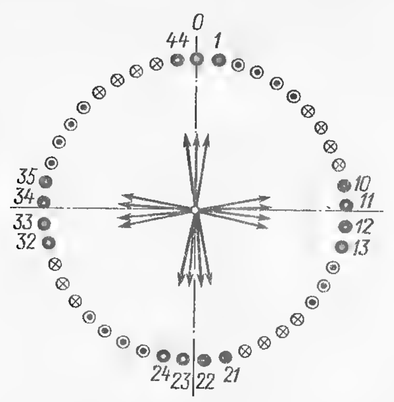


Рис. 7.27. Диаграмма пазных ЭДС обмотки по рис. 7.25 и 7.26

Повышенные числа параллельных ветвей могут быть получены и при бо́льших числах пар полюсов, если в этом встретится необходимость, что, однако, маловероятно; в частности, получение трех параллельных ветвей при любом числе пар полюсов, не кратном трем, требует только одного условия — чтобы общее число секций в фазе было кратно трем. Охватить здесь все возможное многообразие не представляется ни возможным, ни нужным; тем не менее, пути, которыми нужно следовать в таких случаях, остаются одними и теми же — надо добиваться получения минимальных значений разностей амплитуд ЭДС ветвей и минимального их отклонения от синфазности, однако избегая при этом по возможности применения ненормальных деталей.

Построение звезды векторов ЭДС всех секций обмотки или хотя бы одной ее фазы представляет довольно трудоемкий процесс, особенно когда общее число пазов на окружности якоря имеет такие значения, как $63 = 3^2 \cdot 7$ или $99 = 3^2 \cdot 11$ или еще более высокие; однако его можно заменить составлением таблицы обмотки, подобной образцу, показанному в § 5.3.

7.6. ОБМОТКИ, СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ В ОТНОШЕНИИ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ЭДС

Форма кривой ЭДС крупных синхронных генераторов с большими числами пазов на полюс и фазу, особенно турбогенераторов, обычно очень близка к синусоидальной. Это происходит потому, что применяемое укорочение шага если и не всегда исключает полностью, то во всяком случае сильно уменьшает гармонические ближайших порядков $\nu = 5$ и 7; следующие за ними гармонические порядков $\nu = 11$, 13 и т. д. имеют относительно невысокие значения обмоточных коэффициентов, а наиболее опасные гармонические зубцовых порядков первой серии отодвинуты настолько далеко, что трудно было бы ожидать их наличие в сколько-нибудь заметных размерах в кривой магнитного поля индуктора, так что нет особой необходимости принимать против них какие-либо специальные меры, как скос пазов якоря и т. п.

Однако в отдельных случаях, например в целях питания измерительных установок, требуется иметь синхронные генераторы с достаточно чистой кривой ЭДС при таких небольших мощностях, что применить в них большие числа пазов на полюс и фазу ста-

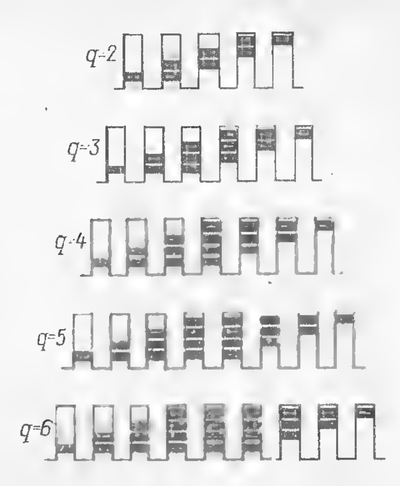


Рис. 7.28. Двойное укорочение шага в четырехслойной обмотке

новится затруднительным. В этих случаях, чтобы не прибегать к изготовлению сердечников с большими числами мелких пазов, которые не могут быть использованы по другому назначению, остается только применять специализированные формы обмоток, предназначенные для подавления всех высших гармонических, кроме зубцовых, борьба с которыми невозможна ни при каком устройстве обмоток якоря.

В главе пятой было показано, что при дробных числах пазов на полюс и фазу с четными знаменателями часто встречаются такие случаи, когда эквивалентная обмотка представляется в виде двухслойной с некоторым укорочением шага, хотя с действительным укорочением шага данной обмотки оно не имеет ничего общего. Таким образом, эти обмотки имеют как бы два укорочения шага, накладывающиеся друг на друга. Возникает мысль осуществить это же самое при целых числах пазов, применив двойное, тройное и большее укорочение шага.

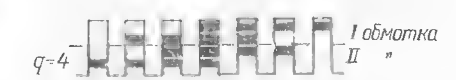


Рис. 7.29. Вариант двойного укорочения шага

Технически наиболее простым способом осуществления такой идеи является наложение на сердечник якоря двух и более двухслойных обмоток с укорочением шага, сдвинутых по отношению друг к другу. На рис. 7.28 представлены распределения сторон секций одной фазы при двух двухслойных обмотках с укорочением шага на одно зубцовое деление, сдвинутых друг относительно друга на два зубцовых деления, при числах пазов на полюс и фазу от $q = 2$ до $q = 6$; в табл. 7.1 приведены значения их обмоточных коэффициентов, полученные перемножением коэффициентов распределения на коэффициенты укорочения, соответствующие фактическому шагу и относительному смещению обмоток. Электрические и магнитные свойства этих обмоток не нарушатся, если применить укорочение шага на два зубцовых деления, а смещение обмоток — на одно деление, как для примера показано на рис. 7.29 для случая $q = 4$, но расход обмоточных материалов и вылет лобовых частей соответственно уменьшатся.

Варьируя укорочение шага и смещение, можно в известной степени управлять свойствами таких обмоток, но это тем труднее,

чем меньше число пазов на полюс и фазу; однако может быть предложено относительно очень простое устройство обмотки, дающее весьма высокую степень очищения от высших гармонических уже при самом малом целом числе пазов на полюс и фазу: $q = 2$. В принципе оно представляет наложение на якорь двух последовательно соединенных однослойных обмоток со средней шириной секций, находящейся в отношении $2:1$, имеющих

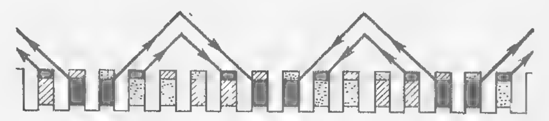


Рис. 7.30. Обмотка с практически полным подавлением гармонических (кроме зубцовых порядков)

различные числа витков; чем машина меньше, тем при прочих равных условиях можно ожидать большее число витков в ее секциях и тем точнее может быть подобрано требуемое соотношение этих чисел. На рис. 7.30 дан отрезок примерной схемы одной фазы такой обмотки.

Таблица 7.1. **Обмоточные коэффициенты четырехслойных обмоток для подавления высших гармонических**

Наименование		Число пазов на полюс и фазу q				
		2	3	4	5	6
k_{q1}		0,9659	0,9598	0,9577	0,9567	0,9561
β'		5/6	8/9	11/12	14/15	17/18
β''		2/3	7/9	5/6	13/15	8/9
Порядки гармонических ν	1	0,8080	0,8882	0,9172	0,9278	0,9380
	3	0	0,2887	0,4268	0,4980	0,5387
	5	—0,0580	—0,0243	0,0422	0,0866	0,1149
	7	—0,0580	0,0465	0,0248	—0,0116	—0,0407
	9	0	0	0,0732	0,0449	0
	11	0,0808	—0,0465	0,0159	0,0298	0,0200
	13	0,0808	0,0243	0,0159	—0,0194	—0,0241
	15	0	—0,2887	0,0732	0	—0,0387
	17	—0,0580	—0,8882	0,0248	0,0194	—0,0072

Дополнительная однослойная обмотка с шириной секций, равной половине полюсного деления, в отношении электрических свойств должна рассматриваться как имеющая только один паз на полюс и фазу; действительно, если удалить ее секции через одну, то от этого только уменьшится вдвое ее ЭДС, сохранив полностью свою форму. Свойством такой обмотки является равенство единице коэффициентов распределения для всех гармонических нечетных порядков, а при укорочении шага $\beta = 0{,}5$ абсолютные значения всех коэффициентов укорочения одинаковы, а знаки попарно чередуются.

Таким образом, обмоточные коэффициенты обеих обмоток будут следующие:

Порядок ν	1	3	5	7	9	11
$k'_{w\nu}$ (основная обмотка)	0,9659	0,7071	0,2588	—0,2588	—0,7071	—0,9659
$k''_{w\nu}$ (дополнительная)	0,7071	—0,7071	—0,7071	0,7071	0,7071	—0,7071

Если бы обе обмотки имели одинаковые числа витков, то при последовательном включении были устранены гармонические всех порядков, кратных трем; но в этом нет необходимости, так как они и без того исключаются сопряжением фаз в звезду. Исключить гармонические зубцовых порядков $\nu_z = 11$ и 13, 23 и 25 и т. д. никаким устройством обмотки нельзя; но гармонические порядков $\nu = 5$ и 7, 17 и 19, 29 и 31 и т. д. могут быть если не исключены полностью, то в очень значительной степени подавлены подбором чисел витков составляющих обмоток. Однако здесь удобнее оперировать не с числами витков, а с пропорциональными им числами проводников в каждом пазу s' и s'', произведения которых на соответствующие обмоточные коэффициенты $k'_{w\nu}$ и $k''_{w\nu}$ должны быть одинаковы по абсолютным значениям, откуда

$$s'/s'' = k''_{w\nu}/k'_{w\nu}.$$

Согласно свойствам пропорций

$$\frac{s'}{s'+s''} = \frac{k''_{w\nu}}{k'_{w\nu}+k''_{w\nu}} = \frac{0{,}7071}{0{,}2588+0{,}7071} = 0{,}7321 = \sqrt{3}-1. \quad (7.8)$$

Это число иррационально, и точно выдержать его нельзя, но даже при самых малых общих числах проводников в пазу $s = s' + s''$ отклонения от него достаточно невелики, как можно видеть из следующих ближайших значений отношений s' к s:

Общее число проводников s	4	5	6	7
Число проводников основной обмотки s'	3	4	4	5
То же дополнительной обмотки s''	1	1	2	2
Отношение s'/s	0,7500	0,8000	0,6667	0,7143

s	8	9	10	11	12	13	14	15
s'	6	7	7	8	9	10	10	11
s''	2	2	3	3	3	3	4	4
s'/s	0,7500	0,7778	0,7000	0,7273	0,7500	0,7692	0,7143	0,7333

При дальнейшем увеличении общего числа проводников пределы отклонения еще уменьшаются; кроме того, с его увеличением становится все легче выбрать из ближайших общих чисел проводников то, которое дает наименьшее отклонение. Полученные здесь зависимости k_{w5} и k_{w7} от отношения s'/s линейны и обратны по знаку; если считать, как это в общем недалеко от действительности, что содержание гармонических таких порядков в поле индуктора обратно пропорционально самим этим порядкам, то получится, что в пределах отношения $s'/s = 0{,}7059 \ldots 0{,}7500$,

в которые укладываются все дальнейшие значения s'/s, содержание пятой гармонической в кривой ЭДС будет не более 0,55 %, а седьмой — менее 0,4 %. Скос пазов якоря (или полюсных наконечников индуктора), который должен быть применен для подавления гармонических зубцовых порядков, еще уменьшит это содержание.

Пока предполагалось, что обе обмотки, и основная, и дополнительная, являются однослойными; но, например, основная обмотка может быть двухслойной с укорочением шага. При $q = 2$ всякое укорочение шага сохранит равенство абсолютных значений ее коэффициентов k_{w5} и k_{w7}; поэтому число витков дополнительной обмотки должно будет измениться. Единственно целесообразным является здесь укорочение $\beta = 5/6$; при нем эти коэффициенты примут абсолютные значения $|k_{w5}| = |k_{w7}| = 0{,}2588^2 = 0{,}0670$ и соответственно

$$\frac{s'}{s' + s''} = \frac{k''_{w\nu}}{k'_{w\nu} + k'_{w\nu}} = \frac{0{,}7071}{0{,}0670 + 0{,}7071} = 0{,}9134. \qquad (7.9)$$

Это число тоже иррационально; его становится несколько труднее подбирать, но при нем содержание гармонических от неточности подбора понижается еще в 0,2588/0,0670 = 3,86 раза.

Число пазов $q = 2$ настолько мало, что в машинах даже очень небольших размеров с числами пар полюсов от двух до четырех без особого труда могут быть применены бо̀льшие числа q. Согласно структуре обмоток данного вида речь может идти только о четных числах пазов на полюс и фазу, как $q = 4$ или 6, которые можно рассматривать как удвоение или утроение пазов обмотки с $q = 2$ или удвоение пазов обмоток с $q = 2$ или 3 с сохранением отношения s'/s. Отсюда следует, что коэффициенты распределения таких производных обмоток должны сохранить особенности коэффициентов распределения исходных обмоток; в частности, если они в этих последних были сведены до малых значений подбором отношения s'/s, то же самое будет и в производных обмотках. Ниже приводятся значения обмоточных коэффициентов обмоток с числами $q = 2$, 4 и 6 при идеальном соотношении s'/s и неукороченном шаге основной части обмотки:

ν	1	5	7	11	13	17
При $q = 2$	0,8955	0	0	—0,8955	—0,8955	0
» $q = 4$	0,8879	0	0	—0,1169	0,1169	0
» $q = 6$	0,8855	0	0	—0,0943	0,0853	0

ν	19	23	25	29	31	35
При $q = 2$	0	0,8955	0,8955	0	0	—0,8955
» $q = 4$	0	—0,8879	—0,8879	0	0	0,1169
» $q = 6$	0	—0,0853	0,0943	0	0	—0,8865

Особенно удобным здесь является $q = 4$, так как при нем можно применить укорочение шага $\beta = 11/12$ и этим понизить

абсолютные значения обмоточных коэффициентов для порядков $\nu = 11$ и 13 настолько, что содержание гармонических этих порядков в кривой ЭДС будет пренебрежимо малым, подобно обмотке шестифазного тока. Именно это число пазов может быть рекомендовано для данного применения.

Полную противоположность рассмотренным обмоткам представляют обмотки, предназначенные для использования высших гармонических поля в зазоре электрической машины, например для целей самовозбуждения небольших синхронных машин. Не вдаваясь в анализ достоинств или недостатков такого использования, следует лишь рассмотреть, каким требованиям должны удовлетворять такие обмотки.

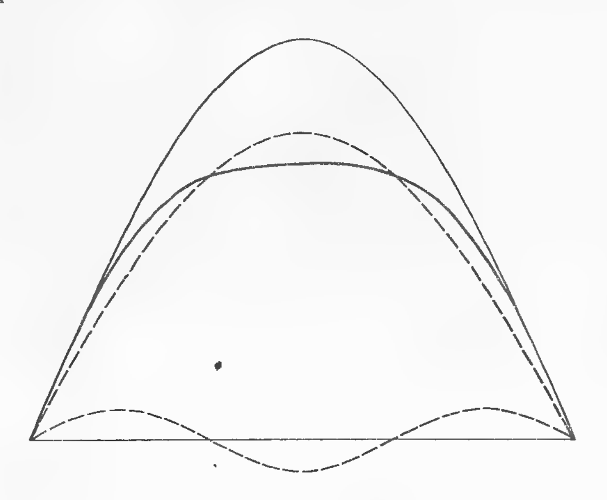


Рис. 7.31. Возникновение третьей гармонической от насыщения магнитной цепи

В § 3.1 было показано, что, например, в поле явнополюсного индуктора наиболее ярко представлена гармоническая пятого порядка, а следом за ней — седьмого; что касается гармонической третьего порядка, то при отсутствии нагрузки и невысоких степенях насыщения сердечника машины ее присутствие мало ощутимо. Таким образом, казалось бы, нужно строить обмотку из расчета использования гармонической с $\nu = 5$; однако положение резко изменяется с появлением нагрузки обмотки якоря, особенно при значительном насыщении зубцов сердечника, вызывающем уплощение формы кривой даже идеально синусоидального поля.

На рис. 7.31 в схематическом виде представлено, каким образом уплощение формы кривой поля ведет к возникновению гармонической третьего порядка. Здесь тонкой кривой показано синусоидальное распределение МДС, которому было бы пропорционально распределение индукции при отсутствии насыщения,

жирной кривой — распределение индукции с учетом насыщения, а тонкой штриховой линией — основная волна новой кривой распределения индукции, заметно отличающаяся от первоначальной синусоиды. Между этой основной волной и уплощенной кривой индукции на каждом полюсном делении заключаются три площадки, соответствующие трем полуволнам гармонической с $\nu = 3$. Особенностью этой гармонической является то, что она движется вместе с основной волной, не изменяя своего расположения относительно последней. Нагрузка обмотки якоря, деформирующая своей реакцией форму поля индуктора, в еще большей степени способствует наращиванию этой гармонической.

Несмотря на схематичность рис. 7.31, из него достаточно ясно видно, что насыщение, понижающее наибольшую индукцию в зазоре почти на 30 %, ведет к возникновению гармонической с $\nu = 3$ в размере всего лишь 7,7 % от первоначальной основной волны (сплошная тонкая кривая) или 10 % от основной волны разложения уплощенной кривой (тонкая штриховая линия). Из этого можно сделать вывод, что в целом идея использования высших гармонических не отличается высокой эффективностью.

Полюсное деление гармонической третьего порядка втрое меньше полюсного деления основной волны; поскольку обмотка работает на отдельный приемник, например выпрямительную установку, нет оснований вводить какое-либо укорочение шага. Если число пазов на полюс и фазу основной обмотки целое, то число пазов на полюс кратно трем и шаг данной обмотки будет диаметральным по отношению к своему полю. Одновременно обеспечивается отсутствие в данной обмотке ЭДС основной частоты, так как многоугольник, составленный из векторов ЭДС этой частоты, индуктированных во всех секциях данной обмотки, будет замкнутым.

Для того чтобы такую обмотку можно было сделать трехфазной, необходимо, чтобы число пазов на полюс и фазу основной обмотки было кратно трем. Поскольку дело касается главным образом машин небольшой мощности, последнее должно быть либо $q = 3$, либо в крайнем случае $q = 6$; однако число фаз может быть и иным, например $m = 2$ или даже $m = 1$, хотя это и понижает эффективность обмотки, и без того невысокую. Возможно рассматривать также несимметричные обмотки или обмотки с дробными числами пазов на полюс и фазу; однако в этих случаях большей частью уже нельзя гарантировать отсутствие ЭДС основной частоты.

Глава восьмая

ОБМОТКИ ЯКОРЕЙ КОЛЛЕКТОРНЫХ МАШИН

8.1. ОСОБЕННОСТИ ОБМОТОК КОЛЛЕКТОРНЫХ МАШИН

При всем внешнем сходстве обмоток якорей бесколлекторных и коллекторных машин последние имеют свои специфические особенности, определяемые прежде всего тем, что каждая их секция впаивается в две пластины коллектора, иногда лежащие рядом, а иногда и отстоящие более или менее далеко одна от другой, и в каждую пластину впаиваются выводы по крайней мере двух секций, чем и создается соединение их в целую обмотку со всеми ее разновидностями, чуждыми обмоткам бесколлекторных якорей.

Пока дело касается обмоток из многовитковых проволочных секций («всыпных» обмоток), никаких различий между обмотками коллекторных и бесколлекторных якорей, по существу, нет: те и другие заготовляются на шаблонах одинаковой формы, а «всыпание» сторон секций в пазы снаружи легче, чем изнутри. При этом секциями одной и той же формы можно выполнять как петлевые, так и волновые обмотки, различие между ними состоит лишь в так называемом «заносе» обмотки в пластины коллектора: выводы секций первых впаиваются в соседние пластины, а вторых — в отстоящие на полный шаг обмотки, т. е. почти точно на два полюсных деления коллектора.

Однако границей применения всыпных обмоток для коллекторных машин являются гораздо более низкие мощности, чем для бесколлекторных; если в последних всыпные обмотки встречаются при мощностях, доходящих до 100—150 кВт и даже более, то в первых их применение ограничивается обычно лишь единицами киловатт.

При переходе к жестким секциям следует прежде всего отметить, что если под «секцией» понимать электрически отдельную часть обмотки, имеющую выводы начала и конца, то в двухслойных обмотках бесколлекторных машин, более всего похожих на обмотки коллекторных, каждый паз содержит нормально две стороны различных секций, одну над другой, имеющие полную корпусную изоляцию (если не считать, например, такие специальные исполнения, как обмотки для полуоткрытых пазов, в которых каждая сторона секции состоит из двух столбиков проводников с отдельной корпусной изоляцией); между тем в коллекторных обмотках лишь в относительно редких случаях в каждом слое паза содержится только одна сторона секции, но большей частью их несколько — от двух до пяти, по возможности с общей корпусной изоляцией.

Секции обмоток бесколлекторных машин, за исключением наиболее крупных, содержат большее или меньшее число витков

(если не считать волновые обмотки, секции которых даже при небольших мощностях обычно делаются одновитковыми); наоборот, жесткие секции коллекторных обмоток большей частью являются одновитковыми и лишь изредка имеют два или более витков, хотя известно множество способов выполнения таких секций. Соответственно этому, если для бесколлекторных машин стержневые обмотки с соединением стержней хомутиками применяются при мощностях обычно по крайней мере в тысячи киловатт, то в коллекторных они встречаются иногда прямо от границы применимости жестких секций.

Обмотка бесколлекторной машины иногда может быть замкнутой в неразрывный контур, как, например, при глухом сопряжении фаз в треугольник, но и в этом случае имеет ограниченное число выводов; обмотка коллекторной машины, напротив, не имеет ни начала, ни конца и не снабжается выводами (кроме обмоток якорей одноякорных преобразователей, генераторов двойного тока или генераторов постоянного тока с делителями напряжения, но тогда она одновременно приравнивается к бесколлекторной).

Для обмоток коллекторных машин не существует ряд понятий, важных для обмоток бесколлекторных: число пазов на полюс и фазу, коэффициенты распределения, форма графика МДС и т. п.; и наоборот, ряд понятий, важных для обмоток коллекторных машин, которые встречаются в дальнейшем изложении, не имеет аналогии для обмоток бесколлекторных. Совершенно разное содержание имеет понятие о симметричности обмоток. Число параллельных ветвей, которое в обмотках бесколлекторных машин большей частью может иметь несколько разных значений, в обмотках коллекторных машин однозначно определяется видом обмотки и числом пар полюсов и в отличие от первых может быть только четным; поэтому его принято обозначать символом $2a$.

Шаг обмотки, который для бесколлекторных машин редко принимается диаметральным (кроме фазных роторов асинхронных двигателей, где он, наоборот, большей частью именно диаметральный), для обмоток коллекторных машин берется по возможности близким к диаметральному, но точно диаметральным бывает далеко не всегда. Само понятие о шаге для коллекторной обмотки отлично от этого понятия для обмоток бесколлекторных машин: если в последней он представляет число зубцов, охватываемых секцией, то в первой он равен увеличенному на единицу числу пропущенных сторон секций, а число охватываемых зубцов может быть при этом различным — оно зависит от числа сторон секций в одном слое каждого паза, которое, как уже было указано, обычно больше единицы. Более того, число зубцов сердечника, охватываемых разными секциями, при так называемых *ступенчатых* обмотках (см. далее § 8.2) может различаться на единицу. Наконец, сердечник может и вовсе не иметь зубцов.

По этой причине для коллекторных обмоток введено понятие о так называемом *элементарном пазе*, под которым понимаются

две стороны разных секций, лежащие одна над другой (а при беззубцовом якоре — рядом), и отсчет шагов ведется по ним. Наряду с этим для коллекторных обмоток введено понятие о *шаге по коллектору*; эта величина является определяющей вид обмотки и выражается увеличенным на единицу числом пластин коллектора, заключающихся между точками присоединения к нему начала и конца каждой секции обмотки. Таким образом, если секция присоединяется к соседним пластинам коллектора, то ее шаг равен единице. По элементарным пазам ведется счет и частичных шагов обмотки коллекторного якоря.

Значения каждого из частичных шагов обмотки, а следовательно, и ее полного шага, равного их алгебраической сумме, для всех секций данного якоря одинаковы; однако чтобы можно было считать обмотку *равносекционной*, необходимо, чтобы одинаковой была и геометрическая ширина всех секций; тогда как левые, так и правые стороны всех секций будут укладываться одинаковым образом в одинаково отстоящие пазы — если левая сторона некоторой секции занимает крайнее левое положение в верхнем слое, то и ее правая сторона занимает крайнее левое положение в нижнем слое, и т. д.

Для полной симметричности коллекторной обмотки необходимо, чтобы число пазов якоря Z, число пластин коллектора K и число полюсов $2p$ были кратны числу параллельных ветвей $2a$, т. е. чтобы

$$\frac{Z}{2a} = \text{целое число}; \quad \frac{K}{2a} = \text{целое число}; \quad \frac{2p}{2a} = \text{целое число}. \tag{8.1}$$

Однако, как будет видно из дальнейшего, такие требования являются чрезмерными, препятствуют применению сложных видов обмоток и не способствуют хорошей коммутации; но даже и при их соблюдении в реальной машине всегда существует некоторая неодинаковость ЭДС отдельных параллельных ветвей, например, из-за различия магнитных потоков разных полюсов вследствие неодинаковости зазоров под ними. По этой причине обычно приходится довольствоваться более облегченными требованиями, обеспечивающими только *примерное равенство* ЭДС ветвей, но и его оказывается достаточным для исправной работы машины.

Существенным различием между обмотками бесколлекторных и коллекторных машин является расположение проводников в пазах: у первых они всегда укладываются в паз большей стороной сечения поперек паза, а меньшей по его высоте; это распространяется также и на элементарные проводники составных сечений стержней. Между тем во вторых такое расположение создавало бы неудобства при впаивании проводников в пластины коллектора, и потому проводники располагаются большей стороной сечения по высоте паза. Это в известной степени может быть оправдано тем, что в большинстве наиболее крупных машин

постоянного тока, как, например, в прокатных двигателях, число пар полюсов относительно невелико; так, при частоте вращения 50—100 об/мин они имеют обычно 10—12 пар полюсов, что соответствует частоте перемагничивания якоря 8—20 Гц, и, следовательно, добавочные потери от вихревых токов, пропорциональные квадрату частоты, значительно меньше, чем были бы при прочих равных условиях при частоте 50 Гц, даже если учесть, что форма кривой изменения тока в проводниках далека от синусоидальной.

Известны попытки применения проводников обмотки якоря, составленных из нескольких элементарных проводников с переплетением наподобие применяемого при транспозиции (см. § 3.11); однако относительно малые размеры пазов якорей даже наиболее крупных машин постоянного тока не позволяют выполнить это в полной мере, а потеря части площади сечения паза весьма ощутительна. В тяговых двигателях с высокой частотой перемагничивания применяется иногда все же расположение проводников большей стороной сечения поперек паза; при подходе к коллектору их приходится выкручивать; благоприятствующим фактором при этом является свойственная таким двигателям малая разность диаметров якоря и коллектора.

Все многообразие видов коллекторных обмоток относится собственно к обмоткам якорей машин постоянного тока, поскольку коллекторные машины переменного тока не получили значительного развития и ограничиваются небольшими мощностями, для которых достаточны обмотки самых элементарных видов — простая волновая и простая петлевая. Поэтому все дальнейшее изложение относится к обмоткам якорей машин постоянного тока, от малых до наиболее крупных; тем не менее сочтено целесообразным принять наименование данной главы в наиболее обобщающем виде.

8.2. ПРОСТЫЕ ПЕТЛЕВЫЕ ОБМОТКИ

Как было отмечено в главе второй, двухслойная петлевая обмотка в принципе может быть выполнена при любом числе пазов, и только требования симметричности налагают на это число такие ограничения, как кратность числу фаз, а для обмоток с целыми числами пазов на полюс и фазу — также кратность числу полюсов. Первое требование для коллекторных обмоток не имеет смысла, но второе остается в силе и для них, только оно распространяется на число элементарных пазов. Однако уже при малых мощностях желательно, чтобы число пазов сердечника якоря было кратно числу пар полюсов, иначе трудно обеспечить удовлетворительную коммутацию машины. Только в двухполюсных машинах число пазов может быть любым, но мощность таких машин редко превосходит немногие киловатты, и потому все рассуждения следует вести для обмоток с числом полюсов не ниже $2p = 4$.

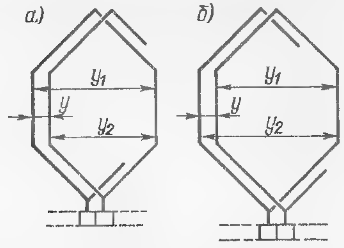


Рис. 8.1. Шаги петлевой обмотки: *а* — прямоходовой; *б* — обратноходовой

В отличие от петлевых обмоток бесколлекторных машин, для которых нет смысла вводить понятие о частичных шагах, здесь оно приобретает определенное значение, по крайней мере для стержневых обмоток: под *первым частичным шагом* y_1 понимается увеличенное на единицу число элементарных пазов, охватываемых секцией, а под *вторым частичным шагом* y_2 — число элементарных пазов между концом одной секции и началом следующей за ней по схеме обмотки. Поскольку здесь второй частичный шаг откладывается в направлении, противоположном первому, его приходится считать отрицательным. Алгебраическая сумма обоих частичных шагов носит название *полного шага обмотки* y; для простой петлевой обмотки

$$y = y_1 + y_2 = \pm 1. \tag{8.2}$$

Знаку плюс соответствует ход обмотки в направлении первого частичного шага y_1, и такая обмотка называется *прямоходовой* или «правой» (рис. 8.1, *а*); при знаке минус обмотка имеет ход против направления отсчета первого частичного шага и называется *обратноходовой* или «левой» (рис. 8.1, *б*); иногда ей присваивается еще название «перекрещенной», поскольку ее конец перекрещивается с началом. Как правило, применяются прямоходовые петлевые обмотки, так как обратноходовые несколько удлиняют лобовые части секций, но не дают никаких преимуществ.

Число параллельных ветвей в простой петлевой обмотке равно числу ее полюсов:

$$2a = 2p; \tag{8.3}$$

однако сама по себе эта обмотка, являющаяся неразрывным целым, не имеющим ни начала, ни конца, представляет между любыми двумя точками, по существу, только две параллельные ветви, вполне одинаковые, если эти точки расположены по диаметру коллектора; полное же число параллельных ветвей образуется в ней лишь после наложения щеток на коллектор, на ходу машины.

Но так как никакая реальная электрическая машина не может быть свободной от различных неточностей изготовления, например от неодинаковости зазоров между полюсами и якорем, то неизбежно возникало бы неравномерное распределение тока между щетками одной и той же полярности. Чтобы этого не было, в обмотке предусматриваются *уравнительные соединения*, т. е. перемычки между такими точками обмотки, которые одинаково расположены по отношению к полюсам и потому теоретически должны

иметь всегда одинаковый потенциал, почему такие соединения и называют еще «эквипотенциальными».

При числе полюсов, равном $2p = 4$, каждое такое соединение связывает две диаметрально противоположные точки обмотки и имеет вид простой перемычки, уложенной под лобовые части; но при всяком большем числе полюсов каждое из них соединяет число точек обмотки, равное числу пар полюсов p, и соединения приобретают более сложные формы.

В небольших машинах, мощностью порядка нескольких киловатт, достаточно бывает всего трех-четырех соединений, а зачастую для них используются проволочные бандажи на лобовых частях обмотки или на якоре, если его пазы не закрыты клиньями; но чем машина крупнее и чем больше число пар ее полюсов, тем больше приходится устанавливать и уравнительных соединений, а в наиболее крупных из машин с простыми петлевыми обмотками, мощность которых может достигать тысяч киловатт, приходится применять полное возможное число уравнительных соединений, равное K/p.

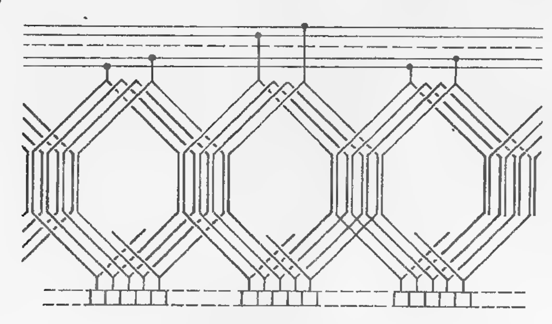


Рис. 8.2. Уравнительные соединения со стороны, противоположной коллектору, в виде кольцевых шин

По месту размещения различаются три вида уравнительных соединений: со стороны коллектора, со стороны, противоположной коллектору, и в петушках, соединяющих обмотку с коллектором.

Наибольшим распространением пользуется размещение соединений со стороны, противоположной коллектору, где обычно имеется достаточно места и соединения доступны для осмотра и проверки; такие соединения имеют вид колец, от которых в нужных местах сделаны отпайки для соединения с обмоткой, как показано на рис. 8.2. Однако такая форма имеет два недостатка: во-первых, она малопригодна для осуществления полного числа соединений, а во-вторых, соединяются между собой не пластины коллектора, потенциал которых подлежит выравниванию, а точки обмотки, отделенные от пластин сторонами секций, примыкающих к данному соединению, с их сопротивлением, в основном индуктивным. Первый недостаток может быть в известной степени устранен, если придать соединениям форму не кольцевых шин

с отпайками, а некоего подобия лобовых частей обмотки (рис. 8.3), укладываемых под основные лобовые части; однако второй недостаток устранить нечем.

От этого второго недостатка свободны соединения со стороны коллектора, поскольку ими соединяются именно те точки, потенциал которых надо выравнивать; однако конструктивное осуще-

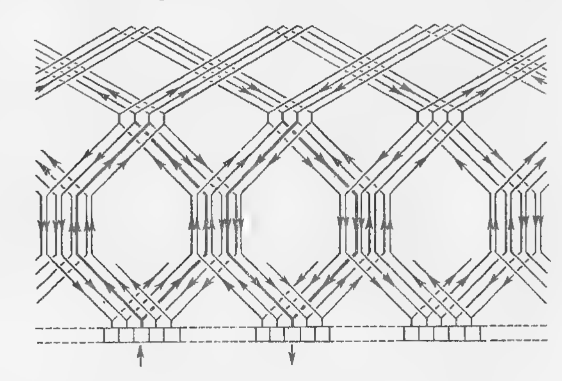


Рис. 8.3. Уравнительные соединения со стороны, противоположной коллектору, в виде лобовых частей обмотки

ствление таких соединений, представленных на рис. 8.4, более затруднительно, чем предыдущих, так как их можно разместить за петушками, и тогда они становятся недоступными, либо на специально предусмотренном продолжении втулки коллектора, что удлиняет машину.

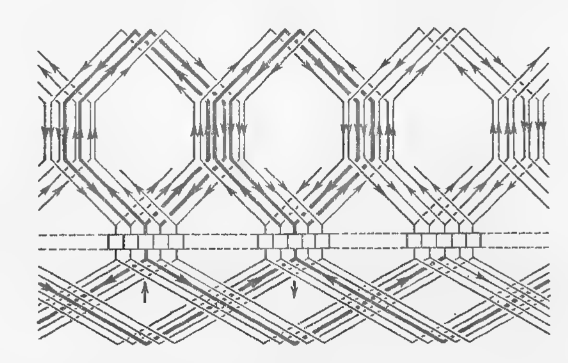


Рис. 8.4. Уравнительные соединения со стороны коллектора

От обоих недостатков свободны уравнительные соединения в петушках (рис. 8.5), в последнее время нашедшие широкое применение в машинах самых больших мощностей; их недостатком является то, что такие соединения могут быть лишь полными, в то время как предыдущие выполнения допускают любую часть полных.

Вне зависимости от места расположения всякие уравнительные соединения, связывающие между собой однородно расположенные точки обмотки, т. е. либо только головки секций, либо только пластины коллектора, носят общее название *уравнительных соединений первого рода*.

Если K — число пластин коллектора, то ему же равно общее число секций обмотки; поэтому между каждыми двумя точками подключения любого уравнительного соединения со стороны коллектора должно находиться число пластин, равное $K/p - 1$,

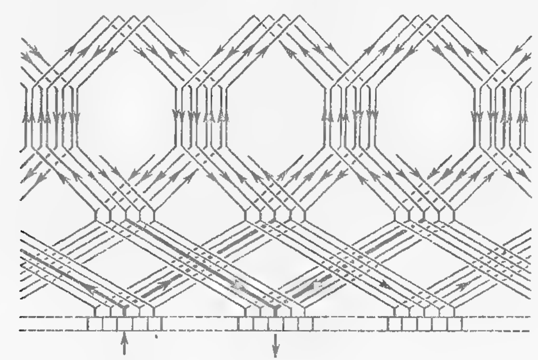


Рис. 8.5. Уравнительные соединения в петушках

или же K/p промежутков между пластинами; если же уравнительные соединения находятся на стороне, противоположной коллектору, то между точками подключения каждого соединения должно находиться $K/p - 1$ головок секций. Частное от деления общего числа секций на число пар полюсов носит название *шага уравнительного соединения*

$$y_y = K/p; \tag{8.4}$$

он равен числу секций на пару полюсов или наибольшему возможному числу соединений.

При неполном числе уравнительных соединений желательно, чтобы точки их подключения были равномерно распределены по окружности якоря; однако при небольших числах соединений это не является строго обязательным, так что число примененных соединений не налагает особых требований на число секций или пластин коллектора K.

В каждом реальном пазу якоря находится одно и то же число элементарных пазов u; поэтому частное от деления общего числа секций на число пазов якоря должно быть целым:

$$u = K/Z = \text{целое}. \tag{8.5}$$

Для того чтобы могли существовать эквипотенциальные точки, число пазов якоря должно быть кратным числу пар полюсов:

$$Z/p = \text{целое число}; \tag{8.6}$$

однако лучше, чтобы результат этого деления был нечетным, потому что в противном случае обе стороны каждой секции будут коммутироваться одновременно, что утяжеляет коммутацию; это находится в противоречии с условиями (8.1), что и было своевременно отмечено.

Чтобы уравнительные соединения при их неполном числе могли быть равномерно распределены по окружности, необходимо, чтобы число элементарных пазов на пару полюсов состояло из первоначальных множителей; тогда любой из них будет являться возможным числом равномерно распределенных соединений.

Пример 8.1. Шестиполюсный якорь имеет число пазов $Z = 75$, а его коллектор — число пластин $K = 225$. Шаг уравнительных соединений равен числу элементарных пазов на пару полюсов $y_y = K/p = 225/3 = 75 = 3 \cdot 5^2$; поэтому в зависимости от необходимости число уравнительных соединений может быть равным одному из чисел: 3; 5; 15; 25; 75. Если бы якорь имел $Z = 69$ пазов и коллектор $K = 207$ пластин, то, поскольку $69 = 3 \cdot 23$, то выбор числа уравнительных соединений был бы крайне ограничен; отбрасывая число 3, как слишком малое, и не принимая полное число 69, для которого в машине не очень больших размеров может не хватить места, нужно было бы принять число соединений равным 23, т. е. снабдить соединениями каждую третью секцию. Однако можно поступить и иначе: принять, например, три одинаковые системы, каждая из которых состоит из трех соединений, расположив их так, чтобы расстояния между точками их подключения, выраженные в числах пластин или головок секций, были $8 + 7 + 8 = 23$. При сравнительно небольшой мощности машины этого вполне достаточно, а некоторая неравномерность распределения точек подключения не должна отрицательно влиять на работу машины.

Дальнейшим мероприятием по облегчению условий коммутации является применение обмоток с секциями разной ширины, или *ступенчатых* обмоток: если, например, левые стороны секций лежат в одном и том же пазу, то правые попадают в разные пазы, или наоборот, как представлено на рис. 8.6 для случая, когда в одном реальном пазу находятся два элемементарных; при этом средняя ширина секций должна быть равна полюсному делению τ. Смысл этого мероприятия состоит в том, что таким образом несколько уменьшается взаимное индуктивное влияние секций при коммутировании и, следовательно, должно быть уменьшено значение размыкаемой ЭДС коммутируемой секции и определяемое им искрение щеток.

Однако крупным недостатком ступенчатой обмотки является то обстоятельство, что при ней нельзя снабдить общей корпусной изоляцией обе стороны секций, попадающие в разные пазы, а следовательно, теряет всякий смысл наложение общей изоляции и на те стороны секций, которые должны лежать в одном и том же пазу; этим понижается доля поперечного сечения паза, которая может быть занята металлом проводников, т. е. ухудшается степень использования объема машины. Кроме того, применение ступенчатых обмоток несколько осложняет условия распределения уравнительных соединений. Наряду с этим известно множество крупных машин с равносекционными обмотками, отличающихся вполне исправной коммутацией; отсюда следует, что

применение ступенчатых обмоток нельзя считать непременным условием обеспечения исправной коммутации и без достаточных оснований оно не может быть рекомендовано.

На рис. 8.7 представлены два из возможных вариантов исполнения ступенчатой обмотки при числе элементарных пазов в одном реальном $u = 3$; здесь, очевидно, средняя ширина секции не может быть точно равна полюсному делению, поэтому предпочтительнее первый вариант, при котором она несколько меньше, чем при втором. При изменении направления вращения якоря оба эти варианта поменяются ролями (если не считать положения сторон секций в верхнем или нижнем слое); это дает основание считать, что условия коммутации изменятся при реверсировании машины, однако опыт не подтверждает такое мнение.

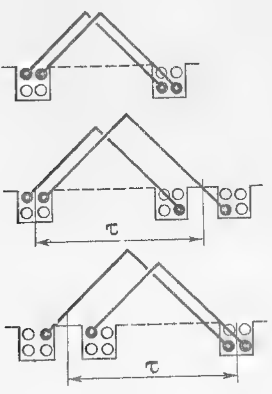


Рис. 8.6. Ступенчатое исполнение секций петлевой обмотки при $u = 2$

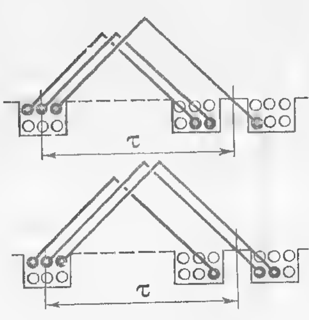


Рис. 8.7. Ступенчатое исполнение секций петлевой обмотки при $u = 3$

При более высоких числах элементарных пазов в одном реальном пазу $u = 4$ и 5 число возможных вариантов ступенчатого исполнения обмотки еще более возрастает, однако добавить здесь что-либо в отношении их вряд ли необходимо; единственное, что можно еще отметить, это то, что при $u = 4$ возможен вариант распределения, когда ширина двух из четырех секций меньше полюсного деления, а двух других — больше; при этом средняя ширина секций точно равна полюсному делению, а общей корпусной изоляцией можно снабжать пары секций, что несколько улучшает использование объема машины.

Иногда якорь снабжается двумя простыми петлевыми обмотками, выведенными к двум коллекторам по обе стороны машины и различающимися только тем, что одна из них является прямоходовой, а другая — обратноходовой; это дает возможность изменять номинальное напряжение машины в отношении 1 : 2 с сохранением ее полной мощности и применяется, например, в машинах, предназначаемых для испытательных установок.

В этом случае в каждом пазу должны находиться не два, а четыре слоя сторон секций, каждый из которых изолирован на полное напряжение машины; одной обмотке отводится самое верхнее и самое нижнее положения сторон секций, а другой обмотке — два средних, что несколько выравнивает их индуктивные сопротивления, способствуя таким образом некоторому улучшению коммутации, но в то же время усложняя укладку секций, которую при неразрезных секциях приходится производить одновременно для обеих обмоток. Это затруднение отпадает в случае применения разрезных секций, укладку которых можно производить по слоям. Следует иметь в виду, что охлаждение обмотки, занимающей средние положения в пазах, несколько ухудшено, поскольку ее лобовые части отгорожены от прямого воздействия вентиляционного воздуха охватывающими их лобовыми частями другой обмотки.

8.3. ПРОСТЫЕ ВОЛНОВЫЕ ОБМОТКИ

В отличие от простой петлевой обмотки частичные шаги простой волновой обмотки откладываются в одну и ту же сторону и потому оба положительны, а полный шаг обмотки равен их арифметической сумме (рис. 8.8):

$$y = |y_1| + |y_2|. \quad (8.7)$$

Таким образом, волновая обмотка обходит окружность якоря крупными шагами и быстро возвращается к тому месту, от которого она была начата. Чтобы она являлась простой, нужно, чтобы конец обхода лег рядом с его началом, т. е. чтобы последняя секция обхода впаивалась в пластину коллектора, соседнюю с той, в которую впаяна первая секция. Если такая пластина лежит за первой, то обмотка является прямоходовой, т. е. с каждым новым обходом продвигается в направлении обходов; если же такая пластина лежит не доходя до первой, то обмотка будет обратноходовой и продвигаться против направления обходов. В отличие от простой петлевой обмотки практически нет различия между обеими этими разновидностями и они могут применяться равным образом в зависимости от условий данного случая. Таким образом, полный шаг простой волновой обмотки должен быть равен

$$y = \frac{K \pm 1}{p}. \quad (8.8)$$

Второе существенное различие простых петлевой и волновой

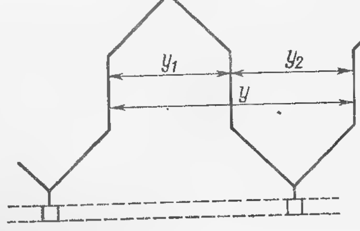


Рис. 8.8. Шаги простой волновой обмотки

обмоток состоит в том, что если число параллельных ветвей первой всегда равно числу полюсов $2a = 2p$, то у второй оно равно двум ($2a = 2$) независимо от числа пар полюсов.

Как и в простой петлевой обмотке, число пластин коллектора или число секций волновой обмотки равно произведению числа пазов на число элементарных пазов в одном реальном, т. е. $K = Zu$; но в петлевой обмотке выбор этого числа определяется необходимостью применения уравнительных соединений и оно должно быть непременно кратно числу пар полюсов, между тем как в волновой обмотке, наоборот, оно не должно быть ему кратно, иначе обмотка замкнется после первого же обхода окружности якоря. Это условие вытекает из равенства (8.8):

$$y = \frac{Zu \pm 1}{p}. \qquad (8.9)$$

Отсюда видно, что полный шаг может быть целым числом только тогда, когда при четном p оба числа Z и u нечетны, а если p нечетно, то число элементарных пазов u не должно быть равно ни числу пар полюсов p, ни любому из его сомножителей, если оно составное. Несколько труднее сформулировать условие, которому должно удовлетворять число пазов Z; проще представить его следующей табличкой:

p	u	Z	p	u	Z	p	u	Z
2	1; 3; 5	$2i \pm 1$	7	1	$7i \pm 1$	9	2	$9i \pm 4$
3	1; 2; 4; 5	$3i \pm 1$		3; 4	$7i \pm 2$		4; 5	$9i \pm 2$
4	1; 3; 5	$4i \pm 1$		2; 5	$7i \pm 3$			
5	1; 4	$5i \pm 1$	8	1	$8i \pm 1$	10	1	$10i \pm 1$
	2; 3	$5i \pm 2$		3; 5	$8i \pm 3$		3	$10i \pm 1$
6	1; 5	$6i \pm 1$	9	1	$9i \pm 1$	12	1	$12i \pm 1$
							5	$12i \pm 5$

Здесь i может быть любым целым числом, но практически редко менее 10 и более 40, в среднем от 25 до 35; таким образом, число пазов на один полюс чаще всего находится в пределах от $12^1/_2$ до $17^1/_2$. Из таблички видно, что для нечетных чисел пар полюсов может быть больше вариантов, чем для четных; особенно неблагоприятными являются числа 6 и 12, при которых возможны числа элементарных пазов u либо 1, что слишком мало, либо 5, что, наоборот, чересчур много. Впрочем, простая волновая обмотка редко применяется при высоких значениях числа пар полюсов, характерных для наиболее крупных машин, являющихся областью применения сложных петлевых обмоток.

Полный шаг y может быть разбит на частичные шаги y_1 и y_2 различными способами, но желательно, чтобы первый частичный шаг был как можно более близким к частному от деления числа

пластин коллектора K на число полюсов $2p$, хотя равным ему быть не может, потому что число секций K простой волновой обмотки не может быть кратно числу пар полюсов. Если этот шаг кратен числу элементарных пазов u, то стороны каждой секции в обоих слоях пазов занимают одинаковое положение, например у левых стенок пазов, и для того чтобы обмотка могла обходить многократно окружность якоря, второй частичный шаг y_2 не должен быть кратен числу u, иначе полный шаг стал бы тоже ему кратен и после первого же обхода обмотка либо замкнулась бы накоротко, либо дала начало сложной волновой обмотке.

При нечетных значениях числа пар полюсов p оба частичных шага могут быть не кратны ему, так как их сложение не должно привести к такой кратности; но при четном p сложение двух нечетных частичных шагов будет давать четность полного шага, следствием чего будет либо замыкание обхода накоротко, либо превращение обмотки в сложную.

Число комплектов щеток для простой волновой обмотки может быть равным всего двум с расстоянием между ними, равным любому нечетному числу полюсных делений коллектора; но фактически, кроме машин самой малой мощности, его принимают равным числу полюсов, иначе пришлось бы бесполезно удлинять коллектор для возможности размещения на нем достаточного числа щеток.

Как и при простой петлевой обмотке, возможно наложение на один и тот же якорь двух одинаковых простых волновых обмоток, выведенных к коллекторам по обе стороны машины; но если там наложение обмотки из цельных секций уже представляло определенные трудности, то здесь они возрастают в еще большей степени и обмотку удобнее выполнять полусекциями, несмотря на увеличение числа паек в хомутиках.

Иногда возникает задача выполнить простую волновую обмотку четырехполюсной машины на якоре с четным числом пазов Z. Это может быть сделано следующим образом: из общего числа секций $K = Zu$, которое при этом четно, одна секция остается не присоединенной к коллектору, имеющему число пластин, на единицу меньшее числа секций; концы этой секции, получающей название *мертвой секции*, обрезаются и заизолировываются. Вследствие этого возникает некоторая асимметрия обмотки — число секций в каждой из двух ее параллельных ветвей за каждый оборот якоря дважды изменяется на ± 1; однако практика показывает, что снабженные такой обмоткой ма-

Рис. 8.9. Волновая обмотка с мертвой секцией

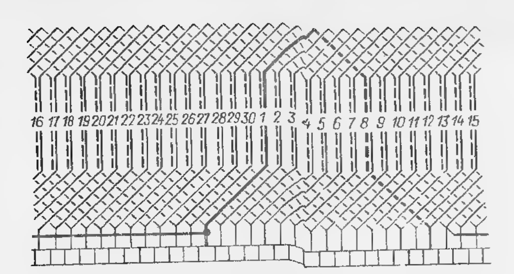


Рис. 8.10. Искусственно замкнутая волновая обмотка

шины мощностью примерно до 100 кВт при частоте вращения до 1500 об/мин работают достаточно удовлетворительно, но попытки выполнения машин с бо́льшим числом пар полюсов дают неудачные результаты. На рис. 8.9 представлена схема такой обмотки, разумеется, с очень уменьшенным числом секций; из него видно, что полный шаг, который должен быть принят равным

$$y = (K - 1)/2, \tag{8.10}$$

может получаться четным, а частичные шаги при этом — равными его половине.

Если совместно с якорем, имеющим четное число пазов, необходимо использовать коллектор с соответствующим ему четным числом пластин, то можно применить *искусственно замкнутую* волновую обмотку. С этой целью полный шаг обмотки принимается таким, как если бы число секций и пластин коллектора было на единицу бо́льшим, а недостающая секция заменяется перемычкой, как показано на рис. 8.10:

$$y = (K + 1)/2. \tag{8.11}$$

По своим свойствам и области применения искусственно замкнутая волновая обмотка мало отличается от обмотки с мертвой секцией.

Пример 8.2. Требуется выполнить четырехполюсную простую волновую обмотку на якоре с числом пазов $Z = 42$; по условиям расчета число элементарных пазов должно быть $u = 3$, так что общее число секций будет $42 \cdot 3 = 126$, одна из которых должна быть мертвой; поэтому коллектор следует сделать с числом пластин $K = 125$. Полный шаг при этом будет равен

$$y = (Zu - 1)/2 = (126 - 1)/2 \approx 62;$$

поскольку он принят четным (хотя мог бы быть и нечетным), то частичные шаги принимаются равными

$$y_1 = y_2 = 62/2 = 31.$$

Число элементарных пазов u может быть и четным, как $u = 2$, так и $u = 4$; в первом случае число секций будет равно 84, число пластин коллектора 83 и полный шаг 42, а во втором эти числа соответственно должны быть равны 168, 167 и 83.

Если бы нужно было применить коллектор с числом пластин $K = 126$, то обмотку с мертвой секцией пришлось бы заменить искусственно замкнутой обмоткой с полным шагом

$$y = (K + 1)/2 = (126 + 1)/2 \approx 63$$

и частичными шагами

$$y_1 = 31 \text{ и } y_2 = 32.$$

8.4. СЛОЖНЫЕ ПЕТЛЕВЫЕ ОБМОТКИ

Если принять полный шаг петлевой обмотки равным не единице, что дает простую петлевую обмотку, а двум, то могут представиться два случая. Если полное число секций обмотки четно, то она распадается на две одинаковые по числу секций обмотки, каждая из которых является простой петлевой, сдвинутые одна относительно другой на некоторый небольшой угол и выведенные к одному и тому же коллектору, так что одна из них соединяется с пластинами нечетной нумерации, а другая — четной. Такая обмотка называется *двухходовой двукратнозамкнутой*; упрощенный пример ее представлен на рис. 8.11, где одна из обмоток нанесена более жирной линией. Если же полное число секций обмотки нечетно, а это может быть только при нечетном числе пар полюсов, то обмотка не распадется на две простые обмотки, а будет представлять одно целое и получает название *двухходовой однократнозамкнутой обмотки* (рис. 8.12). Применение находят обмотки обеих разновидностей.

Аналогично этому, если принять полный шаг петлевой обмотки равным трем, то при полном числе секций, кратном трем, обмотка распадется на три простые петлевые обмотки и получит название *трехходовой трехкратнозамкнутой*. Если же число секций не кратно трем, то обмотка не распадется на простые петлевые обмотки и должна быть названа *трехходовой однократнозамкнутой;* однако коммутация такой обмотки настолько осложнена, что сколько-нибудь широкого применения такие обмотки пока не получили и более подробно рассматривать их здесь не имеет смысла.

Каждая из простых петлевых обмоток, составляющих двукратнозамкнутую, должна иметь свою систему уравнительных соединений первого рода. При этом соединения одной обмотки располагаются со стороны коллектора, а другой — со стороны, противоположной коллектору, т. е. между головками ее секций. Однако это еще не обеспечивает правильную совместную работу обеих обмоток, и в дополнение к ним следует применить еще *уравнительные соединения второго рода*, соединяющие между собой уравнительные соединения первого рода обеих обмоток таким образом, чтобы не могли образовываться контуры с заведомо неуравновешенными ЭДС.

Эти соединения пропускаются с одной стороны якоря на другую под его сердечником, что представляет определенные конструктивные трудности, так как требует применения системы

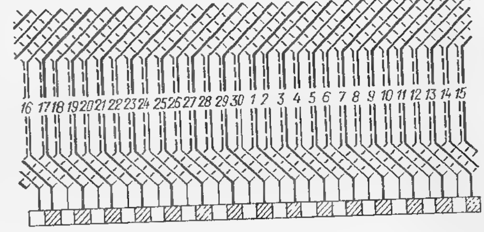


Рис. 8.11. Двухходовая двукратнозамкнутая петлевая обмотка

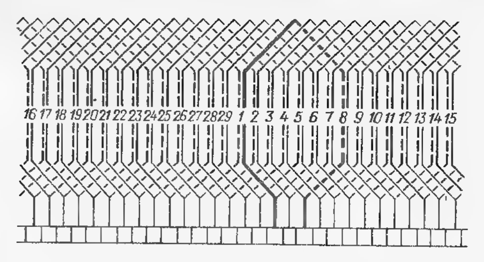


Рис. 8.12. Двухходовая однократнозамкнутая петлевая обмотка

крепления, изоляции и защиты от механических повреждений; по этой причине современное электромашиностроение по возможности избегает применения обмоток данного вида.

Другим недостатком этих обмоток является то, что при всех числах элементарных пазов u, кроме единицы, они должны иметь ступенчатые секции; это ясно из того, что в равносекционных обмотках при четном числе пазов Z любой ход будет занимать все время одно и то же положение в пазу, следовательно, например, при $u = 2$ все секции, лежащие слева, будут принадлежать одной обмотке, а лежащие справа — другой, что сделает невозможной правильную работу уравнительных соединений. Действительно,

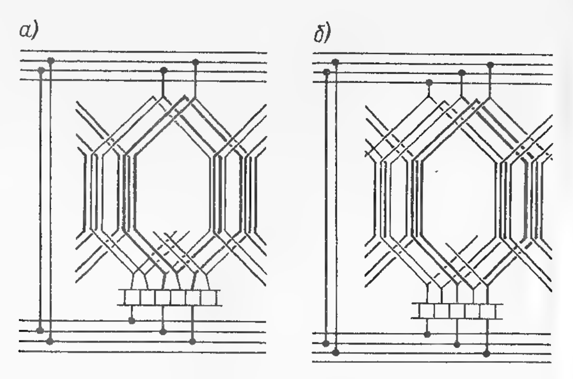


Рис. 8.13. Уравнительные соединения первого и второго рода в равносекционной и ступенчатой обмотках

при равносекционной обмотке уравнительные соединения второго рода соединят параллельно секции одной из обмоток, у которой, например, уравнительные соединения первого рода расположены со стороны коллектора, с контуром, состоящим из двух полусекций другой обмотки, у которой уравнительные соединения первого рода лежат со стороны, противоположной коллектору, как показано на рис. 8.13, *а*; но контуры, соединяемые таким образом, одной стороной лежат в одном и том же пазу, между тем как другие их стороны — в разных пазах, следовательно, их ЭДС различны. При ступенчатом исполнении этого нет — участвующие в рассмотрении стороны секций обеих обмоток лежат в одних и тех же пазах (рис. 8.13, *б*).

В крупных машинах с двухходовыми двукратнозамкнутыми обмотками приходится снабжать уравнительными соединениями

первого рода все секции обеих обмоток по обе стороны якоря и соединять обе системы *уравнительными соединениями третьего рода*, по техническому устройству ничем не отличающимися от уравнительных соединений второго рода, но с полным возможным числом, вносящим полное равенство условий коммутации для секций обеих обмоток, чего уравнительные соединения только второго рода не могут обеспечить. Действительно, при этих последних щетки могут замыкать накоротко отдельные половины секций лишь той из обмоток, которая имеет уравнительные соединения первого рода со стороны, противоположной коллектору; но секции обмотки с соединениями первого рода со стороны коллектора замыкаются щетками полностью и ЭДС в них при этом вдвое больше, чем в отдельных половинах секций первой обмотки. Однако крупным недостатком уравнительных соединений третьего рода является сложность конструктивного осуществления многочисленных перемычек, проходящих под сердечником якоря.

Наибольшей сложности должны были бы достигать уравнительные соединения трехходовых трехкратнозамкнутых обмоток; однако практика пока еще немногочисленных случаев выполнения этих обмоток показала, что достаточное выравнивание потенциала достигается применением уравнительных соединений в петушках, которые выполняют функции соединений одновременно всех видов и практически не занимают лишнего места, но требуют, чтобы разность диаметров якоря и коллектора была достаточно велика. Это требование обычно обеспечивается в наиболее крупных машинах с большими числами пар полюсов, для которых и предназначаются обмотки данного вида.

Получившие большое распространение для крупных машин двухходовые однократнозамкнутые обмотки не могут быть вполне симметричными; однако числа секций на пару полюсов в таких машинах настолько велики, что эта несимметричность не может препятствовать правильной работе машины. Некоторым недостатком этих обмоток является только то, что они могут быть выполнены лишь при нечетных числах пар полюсов, так как в противном случае число секций и пластин коллектора K не может быть нечетным, обеспечивающим неразрывность ходов обмотки.

Во время работы машины число параллельных ветвей обмотки этого вида равно удвоенному числу полюсов: $2a = 2.2p$, как у двукратнозамкнутой обмотки; но оно образуется только через щеточный аппарат машины, без которого обмотка сама по себе имеет число параллельных ветвей, равное числу полюсов: $2a = 2p$.

Достаточными условиями симметричности для этих обмоток можно считать кратность числа пазов Z и числа секций или пластин коллектора K числу пар полюсов p; а так как $K = Zu$, то отсюда следует, что число элементарных пазов u должно быть нечетным. Если исключить $u = 1$, что для машин таких крупных

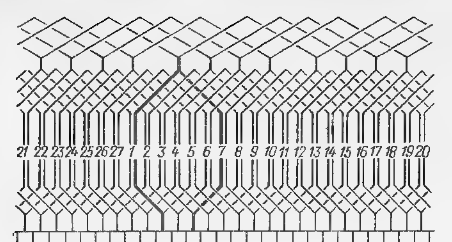


Рис. 8.14. Уравнительные соединения однократнозамкнутой двухходовой обмотки с числом, близким к половине наибольшего возможного

мощностей явно непригодно, то остаются два значения $u = 3$ и 5; однако последнее из них применяется довольно редко, так как при нем трудно обеспечить удовлетворительную коммутацию. Таким образом, по существу, остается только $u = 3$, которое практически и приходится почти всегда иметь. Зато необходимость в ступенчатом исполнении обмотки здесь отпадает и обмотка вполне может быть равносекционной, что облегчает ее выполнение на крупных машинах.

Уравнительные соединения в обмотках этого вида могут быть выполнены разными способами; но так как их шаг должен иметь только нечетное значение, то каждое из них соединяет поочередно секции разных ходов и потому выполняет одновременно функции уравнительных соединений и первого и второго рода. Для наиболее крупных многополюсных машин со значительной разностью диаметров якоря и коллектора с успехом применяются уравнительные соединения в петушках, особенно когда считается желательным иметь полное их число, для которого может не оказаться достаточно места со стороны, противоположной коллектору.

В обмотках этого вида находит применение также своеобразная система уравнительных соединений, число которых близко к половине наибольшего возможного, равного K/p; поскольку оба эти числа нечетны, результат его деления на 2 представляет смешанную дробь и число соединений приходится брать равным ее целой части. Особенность этой системы состоит в том, что на протяжении двух полюсных делений уравнительными соединениями снабжаются подряд все секции одного из ходов, в то время как секции другого хода на этом участке вовсе не имеют соединений, которые появляются в них только на следующей паре полюсных делений, как это показано на рис. 8.14. Таким образом, создается впечатление, что обмотка в целом недостаточно обеспечена средствами выравнивания потенциала и это должно отрицательно сказываться на ее коммутации; однако это неверно — несмотря на кажущуюся несимметричность распределения соединений, их работа вполне удовлетворительна.

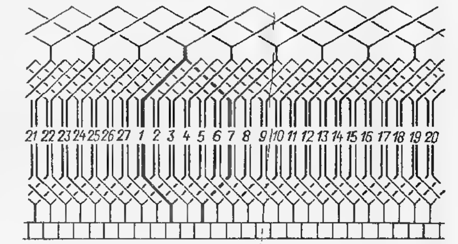


Рис. 8.15. Уравнительные соединения однократнозамкнутой двухходовой обмотки с числом, равным одной трети наибольшего возможного

Поскольку число секций и пластин коллектора K нечетно, в обмотках этого типа нельзя применить точно половину всех возможных соединений; но так как это число большей частью кратно трем вследствие равенства $u = 3$, то можно применить одну третью часть полного числа соединений, причем они будут вполне равномерно распределены по обмотке, как это показано на рис. 8.15, где соединением снабжена каждая третья головка секции каждого обхода.

Пример 8.3. Десятиполюсный генератор мощностью 3000 кВт при напряжении 750 В имел число пазов $Z = 225$, число элементарных пазов $u = 3$ и число пластин коллектора $K = 675$. Число примененных уравнительных соединений было равно целой части половины наибольшего возможного, т. е. 67, с шагом $y_у = 135$. Эти уравнительные соединения располагались следующим образом:

1 — 136 — 271 — 406 — 541 — 1
3 — 138 — 273 — 408 — 543— 3
. . . .
131 — 266 — 401 — 536 — 671 — 131
133 — 268 — 403 — 538 — 673 — 133

При испытании машины обнаружилось, что в режиме короткого замыкания на коллекторе появляется искрение начиная со значения тока около 1/4 номинального; возникло предположение, что причиной его является несимметричность примененной системы уравнительных соединений, и было решено применить вполне симметричную систему, состоящую из 1/3 возможного полного числа, т. е. $675/(5 \cdot 3) = 45$ соединений:

1 — 136 — 271 — 406 — 541 — 1
4 — 139 — 274 — 409 — 544 — 4
. . . .
130 — 265 — 400 — 535 — 670 — 130
133 — 268 — 403 — 538 — 673 — 133

Никакого улучшения коммутации это не принесло — искрение в режиме короткого замыкания по-прежнему начиналось примерно с 1/4 номинального тока. На этот раз неудачный результат был приписан тому, что это число соединений хотя и имеет вполне симметричное распределение, но слишком мало, и было принято решение применить полное возможное число, т. е. 135 соединений. Несмотря на недостаточность места в лобовых частях обмотки со стороны, противоположной коллектору, это удалось выполнить благодаря искусству обмотчика, производившего эту работу; но и на этот раз результат оказался точно таким же, как и раньше.

Как выяснилось при дальнейшем исследовании, этот результат определялся отнюдь не недостатками той или иной системы уравнительных соединений, а неудовлетворительностью распределения магнитного поля в районе коммутируемых секций в режиме короткого замыкания; при нагрузке с полным номинальным напряжением машина коммутировала вполне исправно.

8.5. СЛОЖНЫЕ ВОЛНОВЫЕ ОБМОТКИ

Четырехполюсная простая волновая обмотка может быть выполнена при любом нечетном числе секций якоря K; условием ее выполнения является выбор полного шага y равным половине этого числа, уменьшенного или увеличенного на единицу:

$$y = \frac{K \pm 1}{2}.$$

Дополнительным условием является делимость числа K на число пазов якоря Z, результат которой представляет число элементарных пазов в одном реальном u; при довольно распространенном в таких обмотках значении $u = 1$ это условие отпадает.

Но если в числителе этого выражения вместо единицы поставить 2, то после первого обхода окружности якоря обмотка придет не к одной из двух пластин, соседних с той, от которой был начат обход, а через одну от нее в ту или иную сторону в зависимости от принятого знака в числителе. То же самое будет присходить и после каждого следующего обхода до тех пор, пока наконец обмотка не придет к той пластине, от которой был начат первый обход, и обмотка замкнется в целое, не имеющее ни начала, ни конца. Это целое само по себе будет представлять две параллельные ветви по отношению к любой паре точек на окружности коллектора; в зависимости от выбора таких точек числа секций в этих ветвях могут быть различны: если, например, расстояние между точками равно целой части от 1/4 числа K, то числа секций в ветвях будут различаться только на единицу, а во всех остальных случаях они будут более или менее разными.

Однако если наложить на коллектор щетки и привести якорь во вращение, то окажется, что по отношению к щеткам обмотка будет представлять уже не две, а четыре параллельные ветви. Подобное уже встречалось при рассмотрении двухходовой однократнозамкнутой петлевой обмотки, в которой удвоенное число параллельных ветвей возникает только после наложения щеток на коллектор. Продолжая этот процесс, можно в числителе вместо единицы или двойки ставить любое целое число a, и в работающей машине будет образовываться $2a$ параллельных ветвей обмотки якоря. Однако такая обмотка не сможет удовлетворительно работать, потому что для равномерного распределения тока между параллельными ветвями следовало бы связать уравнительными соединениями эквипотенциальные точки обмотки, но таких точек на коллекторе нет; поэтому при четырех полюсах может существовать только простая волновая обмотка.

Если число пластин коллектора четно и шаги обмотки выбраны так, что после первого обхода обмотка придет не к соседней пластине с той, от которой был начат обход, а через одну от нее, то в результате обмотка будет занимать пластины через одну, т. е. только нечетной или только четной нумерации, оставив половину общего числа пластин свободными. Тогда на этот якорь может быть наложена вторая точно такая же обмотка, которая займет все свободные пластины, и число параллельных ветвей удвоится, несмотря на отсутствие связи между обоими ходами обмотки.

В отличие от предыдущего между такими ходами есть возможность установить уравнительные соединения, потому что по диаметру коллектора располагаются пластины, принадлежащие разным ходам; однако для этого необходимо, чтобы и общее число пазов Z было четно, иначе секции, присоединенные к таким пластинам, не будут находиться в одинаковых положениях по отношению к полюсам машины. Такая двукратнозамкнутая обмотка могла бы быть устроена и в четырехполюсной машине, но это не практикуется, потому что четыре параллельные ветви дает и простая петлевая обмотка, выполнение которой проще, чем волновой.

При большем числе пар полюсов возможность получения сложной волновой обмотки приобретает смысл тем в большей степени, чем выше это число, но вместе с тем к условиям выполнимости обмотки прибавляются новые, ограничивающие эту возможность.

Основное условие состоит в том, что число секций не должно быть кратно требуемому числу пар параллельных ветвей, если нужно получить однократнозамкнутую обмотку, и наоборот, кратно ему, если нужна многократнозамкнутая обмотка. Второе условие требует, чтобы число пазов Z не было кратно числу пар полюсов p; это необходимо и для выполнимости простых волновых обмоток. Полный шаг сложных волновых обмоток

$$y = \frac{Zu \pm a}{p}, \tag{8.12}$$

и для них может быть составлена следующая табличка:

p	a	u	Z	p	a	u	Z
3	2	1; 2; 4; 5	$6i \pm 2$	9	2	1	$18i \pm 2$
4		1; 3; 5	$4i \pm 2$		2	4; 5	$18i \pm 4$
5		1; 4	$10i \pm 2$		2	2	$18i \pm 8$
		2; 3	$10i \pm 4$		3	1; 2; 4; 5	$9i \pm 3$
6	2	1; 2; 4; 5	$6i \pm 2$	10	2	1; 4	$10i \pm 3$
	3	1; 3; 5	$6i \pm 3$		2	2; 3	$10i \pm 4$
7	2	1	$14i \pm 2$		5	1; 3; 5	$10i \pm 5$
		3; 4	$14i \pm 4$	12	2	1; 5	$12i \pm 2$
		2; 5	$14i \pm 6$		3	1; 3; 5	$12i \pm 3$
8	2	1; 3; 5	$8i \pm 2$		4	1; 2; 4; 5	$12i \pm 4$
	4	1; 3; 5	$8i \pm 4$		6	1; 3; 5	$12i \pm 6$

Для нечетных значений p все обмотки — двукратнозамкнутые, за исключением $p = 9$, для которого однократнозамкнутые обмотки возможны при $Z = 9i \pm 3$. Все двукратнозамкнутые обмотки нуждаются в применении уравнительных соединений второго рода, которые соединяют пластины коллектора с головками противолежащих секций; число таких соединений берется обычно в пределах 2,5—3,5 числа пар полюсов. Если число секций может быть разложено на множители так, что один из них (необязательно первоначальный) может удовлетворять указанным пределам общего числа уравнительных соединений, то точки подключения по-

следних распределяются вполне равномерно по окружности якоря; в противном случае приходится допускать их неравномерное распределение, однако подчиняющееся определенной очередности подобно тому, как это было показано в примере 8.1.

При четных значениях p все обмотки получаются однократнозамкнутыми; они тоже нуждаются в применении уравнительных соединений, но в отличие от обмоток с нечетными значениями p эти уравнительные соединения связывают точки, расположенные только по одну сторону якоря, т. е. либо пластины коллектора, либо головки секций, и потому должны быть отнесены к уравнительным соединениям первого рода.

При числе ходов обмотки, равном 2, уравнительные соединения обоих видов соединяют между собой только по две точки обмотки; поэтому каждое из них имеет вид простой перемычки; но при большем числе ходов они соединяют число точек, равное числу ходов, и становятся похожими на уравнительные соединения петлевых обмоток.

Пример 8.4. Для десятиполюсной машины требуется изготовить якорь с волновой обмоткой; по расчету число последовательно включенных одновитковых секций должно быть примерно 65 ± 5 %. Согласно таблицам в § 8.3 и 8.5 при $p = 5$ число элементарных пазов может быть одним из следующих: $u = 1$; 2; 3 и 4. Первое из них слишком мало, и при нем проводники обмотки имели бы чрезмерно большое сечение, а при последнем пластины коллектора получились бы очень узкими; таким образом, на выбор остаются два значения: $u = 2$ и 3. Если принять первое из них, то при простой волновой обмотке число пазов на один полюс нужно будет иметь примерно $6^1/_2$, что слишком мало; но при двухходовой обмотке, которая при этом числе пар полюсов будет двукратнозамкнутой, оно станет вдвое бо́льшим, т. е. около 13, что вполне приемлемо. Если же принять $u = 3$, то о простой волновой обмотке вообще не может быть речи, поскольку число пазов на полюс станет еще меньше, чем при $u = 1$; при двухходовой обмотке оно стало бы порядка $8^2/_3$, но и это недостаточно.

Таким образом, выбор надо остановить на $u = 2$; при нем число пазов должно удовлетворять формуле $Z = 10i \pm 4$, и если положить $i = 13$, то для выбора будут числа $Z = 126$ и 134, а числа секций и пластин коллектора соответственно $K = 252$ и 268. Полный шаг в данном случае должен определяться по формуле

$$y = \frac{Zu \pm 2}{p} = \frac{K \pm 2}{5};$$

для первого числа $K = 252$ это дает $y = 50$ или $50^4/_5$, а для второго $y = 53^3/_5$ или 54. В обоих случаях полный шаг может иметь четное значение, потому оба частичных шага будут одинаковыми, но при первом числе обмотка обратноходовая, а при втором — прямоходовая и имеет соответственно больший шаг, хотя и ненамного.

При обоих значениях полного шага первый частичный шаг имеет нечетное значение, следовательно, не кратное числу элементарных пазов $u = 2$, и потому обмотка получится ступенчатой, что и требуется.

Первое число секций состоит из следующих первоначальных множителей: $252 = 2^2 \cdot 3^2 \cdot 7$, а второе $268 = 2^2 \cdot 67$; поэтому предпочтительнее первое, как допускающее большее разнообразие чисел равномерно распределенных уравнительных соединений. Так, при нем может быть применено 14 уравнительных соединений, т. е. 1,4 соединения на полюс; это вполне удовлетворительно. Интервалы между точками подключения уравнительных соединений будут одинаковыми и равными 18 секциям; на этом основании может быть составлена их таблица (см. также рис. 8.16):

Номер соединения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Номера соединяемых секций	252 126	18 144	36 162	54 180	72 198	90 216	108 234	126 252	144 18	162 36	180 54	198 72	216 90	234 108

По тем же соображениям, которые были изложены в § 5.3, отсчет секций удобно начинать с секции, имеющей номер не 1, а последний, в данном случае 252 или 0.

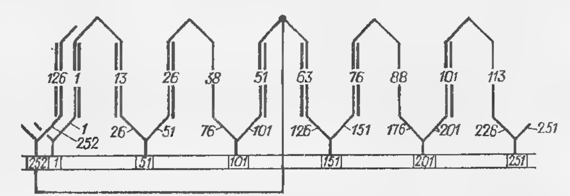


Рис. 8.16. Уравнительные соединения в двухходовой двукратнозамкнутой волновой обмотке

Пример 8.5. На сердечнике с числом пазов $Z = 141$ требуется выполнить волновую обмотку якоря для двенадцатиполюсной машины. Число пазов на один полюс $Z/(2p) = 141/12 = 11^3/_4$ вполне удовлетворительно. Согласно табличке этого параграфа обмотка может быть трехходовой однократнозамкнутой, потому что число пазов удовлетворяет условию $Z = 6i \pm 3$ при $i = 23$ или 24, должна иметь при этом число пар параллельных ветвей $a = 3$. Простая волновая обмотка с числом пар полюсов $p = 6$ при этом числе пазов $Z = 141$ не может получиться, потому что оно не удовлетворяет требованию $Z = 6i \pm 1$, обеспечение которого согласно табличке § 8.3 необходимо для такой обмотки.

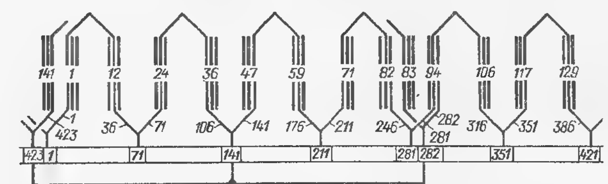


Рис. 8.17. Уравнительные соединения в трехходовой однократнозамкнутой волновой обмотке

Трехходовая обмотка может иметь числа элементарных пазов $u = 1$, 3 и 5. Первое мало для такой обмотки, а последнее слишком велико, и потому целесообразно принять $u = 3$. Таким образом, число секций и пластин коллектора будет равно $K = 141 \cdot 3 = 423$. Полный шаг $y = K/p = 423/6 = 70{,}5$; если принять целую часть $y = 70$, то можно будет иметь одинаковые частичные шаги $y_1 = y_2 = 35$.

Шаг по пазам $y_п = y_1/u = 35/3 = 11^2/_3$ не равен целому числу, и потому обмотка будет ступенчатой, что и необходимо для нее.

Число секций и пластин коллектора состоит из трех первоначальных множителей: $K = 423 = 3 \cdot 3 \cdot 47$; последний множитель подошел бы для числа точек подключения уравнительных соединений, но он не кратен числу ходов: ближайшим кратным последнему является $48 = 3 \cdot 16$. На один полюс это дает $16/12 = 1^1/_3$ соединений, что вполне приемлемо. Если принять число уравнительных соединений равным 16, то шаг их подключений будет равен 423/48 =

$= 8^{13}/_{16}$, т. е. вполне равномерно они не могут быть распределены по окружности и нужно будет чередовать эти шаги в порядке

8 9 9 9 9 8 9 9 9 9 8 9 9 9 9 — три раза;

всего 39 интервалов по 9 секций и 9 интервалов по 8 секций. Такое распределение несколько сложно, но при данном значительном числе секций может быть допущено, только потребует внимания при выполнении.

На основании этой очередности может быть составлена таблица подключений уравнительных соединений (см. также рис. 8.17):

Номер соединения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Номера соединяемых секций	423 141 282	8 149 290	17 158 299	26 167 308	35 176 317	44 185 326	52 193 334	61 202 343	70 211 352	79 220 361	88 229 370	96 237 378	105 246 387	114 255 396	123 264 405	132 273 414

Более однородно могут быть распределены точки подключения, если принять их число равным 18; тогда средний интервал между точками подключения был бы $423/54 = 7^5/_6$; это дало бы возможность чередования точек подключения в порядке

7 8 8 8 8 8 — девять раз;

всего 45 интервалов по 8 секций и 9 интервалов по 7 секций; на один полюс при этом получилось бы $18/12 = 1^1/_2$ уравнительных соединений, что тоже достаточно хорошо.

8.6. КОМБИНИРОВАННЫЕ (ЛЯГУШЕЧЬИ) ОБМОТКИ

Комбинированная обмотка является сочетанием двух обмоток на одном и том же сердечнике якоря — петлевой, которая может быть как простой, так и сложной, и волновой, которая может быть только сложной. Благодаря своеобразному очертанию элемента такой обмотки, состоящего из секций петлевой и волновой составляющих (рис. 8.18), эта обмотка получила название «лягушечьей».

Числа параллельных ветвей обеих составляющих должны быть одинаковы; следовательно, предполагается, что ток распределяется между ними поровну и сечения проводников обеих составляющих равны между собой. Таким образом, если петлевая составляющая является простой, то общее число параллельных ветвей обмотки $2a = 4p$; если же петлевая составляющая сложная, то оно в соответствующее число раз больше.

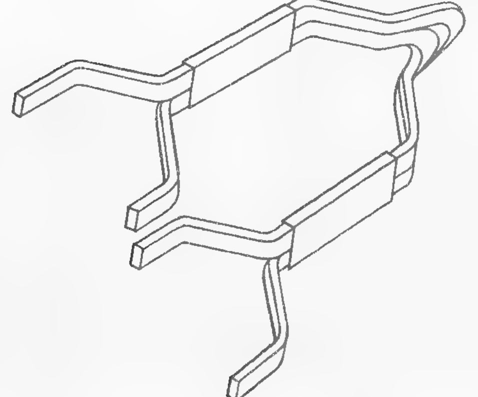


Рис. 8.18. Секции комбинированной обмотки

Комбинированная обмотка не нуждается в уравнительных соединениях, потому что их роль для петлевой составляющей выполняют секции волновой составляющей, и наоборот, для волновой составляющей — секции петлевой, причем те и другие — в наибольшем возможном числе. Число ходов волновой составляющей должно быть равно числу пар параллельных ветвей петлевой составляющей. Это требование ограничивает выбор общего числа пазов якоря, которое, с одной стороны, должно допускать выполнение волновой составляющей, а с другой — удовлетворять требованиям симметричности петлевой составляющей, а именно, чтобы число пазов было кратно числу пар полюсов.

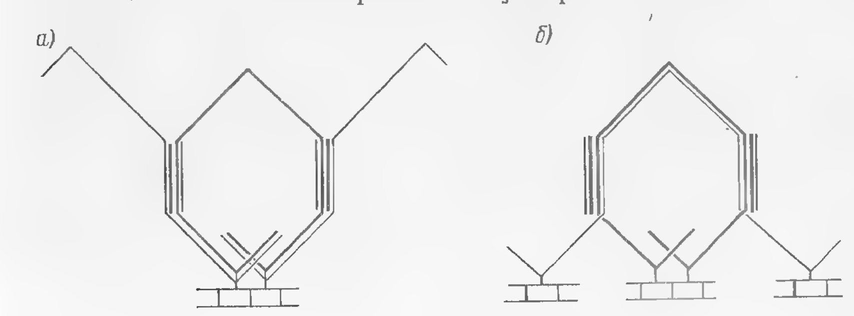


Рис. 8.19. Варианты исполнения комбинированной обмотки: *а* — правильный; *б* — неправильный

Существует много разновидностей исполнения комбинированных обмоток, из которых следует прежде всего отметить две — когда секции впаиваются в пластины коллектора либо «головой», либо «ногами» (рис. 8.19). При первой из них напряжение между активными сторонами петлевой и волновой составляющих в каждом слое паза либо равно нулю, если они впаяны в одни и те же пластины коллектора, либо различается при некоторых схемах на небольшую долю полного напряжения, равную частному от деления последнего на число пазов на один полюс; но при второй разновидности между сторонами секций каждого слоя обеих составляющих существует полное напряжение машины, потому что секции волновой составляющей впаяны в пластины, находящиеся на расстоянии полюсного деления от мест впайки секций петлевой составляющей. Поэтому такое исполнение практически не применяется, хотя оно и давало бы возможность изготавливать секции обеих составляющих без паек со стороны, противоположной коллектору; впрочем, такое исполнение затрудняет укладку таких элементов обмотки в пазы.

При впаивании «головой» в лучшем случае возможно выполнить без паек со стороны, противоположной коллектору, только петле-

вые части элементов обмотки; однако и это затрудняет укладку, и последняя получается наиболее простой тогда, когда все секции делаются разрезными, т. е. в виде отдельных стержней и петлевой и волновой составляющих, хотя число паек со стороны, противоположной коллектору, возрастает при этом вдвое.

Как правило, стороны секций волновой составляющей занимают в пазах самое верхнее и самое нижнее положения, а стороны секций петлевой составляющей укладываются между ними. Соответственно этому вылет секций петлевой составляющей меньше, чем волновой, и лобовые части первой оказываются скрытыми под лобовыми частями второй. Следует признать, что укладка секций комбинированной обмотки труднее, чем только петлевой или только волновой, в которых при разрезных секциях всегда возможно уложить полностью сначала один слой, а потом второй с поочередным запаиванием хомутиков.

Существует много вариантов выполнения элементов комбинированной обмотки, равносекционных и ступенчатых, которые либо допускают совместное изолирование от корпуса сторон секций обеих составляющих, либо требуют их раздельного изолирования; однако при наложении обмотки лобовые части волновой составляющей еще в большей степени затрудняют работу по укладке сторон секций обмотки в пазы, чем при обычной петлевой или волновой обмотке, и потому наиболее удобным является упомянутое выше выполнение обмотки полусекциями, хотя оно и требует большего числа паек. При этом первыми укладываются по всей окружности полусекции нижнего слоя волновой составляющей, затем полусекции нижнего слоя петлевой и ее верхнего слоя; после этого следует запаять хомутики этой составляющей со стороны, противоположной коллектору; и наконец укладывать полусекции верхнего слоя волновой составляющей. В заключение секции обеих составляющих вместе впаиваются в пластины коллектора. В виде варианта при равносекционной петлевой составляющей применяются ее неразрезные секции, но применение неразрезных секций волновой составляющей не может быть рекомендовано, так как крайне затрудняет укладку.

На рис. 8.20 показаны шаги обеих составляющих комбинированной обмотки. Петлевая составляющая, как правило, делается прямоходовой, а волновая может быть как прямоходовой, так и обратноходовой, но первое логичнее, поскольку ее лобовые части должны иметь больший вылет для того, чтобы охватывать лобовые части петлевой составляющей.

Условия выполнимости комбинированной обмотки определяются в общем ее петлевой составляющей, и если последняя является простой, то она должна удовлетворять обычным условиям:

$$Z/p = Z/a = \text{целое число и } K/p = \text{целое число};$$

при соблюдении этих условий простая петлевая обмотка является практически симметричной, и это качество распространяется и на

комбинированную обмотку, построенную на ее основе; число элементарных пазов в одном реальном u ограничивается только соображениями удобства выполнения.

Этим же требованиям должна удовлетворять и двухходовая петлевая обмотка, примененная в качестве основы для комбинированной обмотки, но дополнительным требованием здесь является нечетность числа u, значения которого практически ограничиваются одним $u = 3$, поскольку $u = 1$ применяется крайне редко, а $u = 5$ создает определенные трудности в отношении коммутации, требуя применения щеток значительной ширины. При четном числе пар полюсов петлевая составляющая, как это было упомянуто в § 8.4, является двукратнозамкнутой, а при нечетном — однократнозамкнутой; что касается волновой части, то она во всех случаях может быть сделана однократнозамкнутой и применение многократнозамкнутой вообще не рекомендуется.

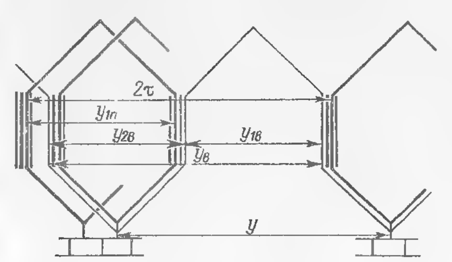


Рис. 8.20. Шаги комбинированной обмотки

Рис. 8.21. Комбинированная обмотка с улучшенными условиями коммутации

В принципе возможно применение трехходовой петлевой составляющей, для чего необходимо выполнение требований, изложенных для такой обмотки в § 8.4; известны случаи применения даже четырехходовой петлевой составляющей, однако по мере увеличения числа ходов прогрессивно возрастают трудности получения удовлетворительной работы вследствие ухудшения условий коммутации.

Ранее упоминалось, что нежелательно, чтобы число пазов якоря было кратным числу полюсов, т. е. чтобы на один полюс приходилось целое их число; но если этого нельзя избежать по каким-либо причинам, то заметное улучшение условий коммутации получается при применении разновидности комбинированной обмотки, отличающейся тем, что активные стороны петлевой и волновой составляющих, впаянные в одни и те же пластины коллектора, располагаются по разные стороны зубцов, как показано на рис. 8.21. Результатом этого является уменьшение индуктивности коммутируемых секций, рассеяние которых перестает быть общим в активных частях секций, что и облегчает условия их коммутации; но зато усложняются изготовление и наложение секций обмотки на якорь — последнее практически может быть выпол-

нено только с применением разрезных секций обеих составляющих и лишь при нечетном числе ходов петлевой составляющей, что сильно ограничивает применение этой разновидности.

Основным преимуществом комбинированных обмоток является отсутствие уравнительных соединений, размещение которых не всегда бывает удобным, и обусловленная этим экономия проводниковых материалов, расход которых в машинах с мощностями, при которых применение комбинированных обмоток может считаться оправданным, достигает 10—15 % их расхода на всю обмотку якоря. Отпадает также и необходимость изыскивать средства закрепления уравнительных соединений, что упрощает конструкцию якоря.

Вторым существенным преимуществом является вдвое меньшая высота проводников в пазу якоря с комбинированной обмоткой, вследствие чего добавочные потери от вихревых токов по сравнению с проводниками полной высоты уменьшаются в 16 раз. Кроме того, циркуляционные токи, которые дают значительную долю добавочных потерь в обычных обмотках даже при условии подразделения сечения проводников по высоте на две части, в комбинированных обмотках практически отсутствуют, потому что им приходится замыкаться по очень длинным путям и через щеточные контакты на двух полярностях.

Что касается недостатков комбинированных обмоток, то наиболее существенным из них является сложность изготовления и наложения обмотки, большее число паек и больший расход изоляционных материалов, а потому худшее заполнение поперечного сечения паза якоря металлом проводников обмотки. Кроме того, вследствие затрудненности доступа вентиляционного воздуха к лобовым частям петлевой составляющей ее охлаждение ухудшено по сравнению с волновой, а доступ к этой составляющей сильно затруднен, что осложняет ее ремонт.

Что касается условий коммутации, на радикальное улучшение которых возлагались надежды при разработке комбинированных обмоток, то за истекшее с тех пор время и петлевые обмотки заметно усовершенствовались, так что было бы трудно отдать какой-либо системе абсолютное предпочтение. В результате в зависимости от местных условий целые крупные электромашиностроительные предприятия являются либо поборниками, либо противниками применения комбинированных обмоток, особенно в наиболее крупных машинах, для которых они собственно и предназначались. Правильно выполненные сложные петлевые обмотки отличаются отнюдь не худшими коммутационными свойствами, на которые в большей степени влияют состояние коллектора и щеточного аппарата, а также подбор формы наконечников добавочных полюсов.

Пример 8.6. Требуется выполнить комбинированную обмотку для шестиполюсного якоря с числом пазов в пределах от 100 до 110; чтобы в них можно было разместить число последовательно включенных витков, нужное по расчету машины, число элементарных пазов должно быть $u = 3$.

Числами пазов, кратными числу пар полюсов $p = 3$, в данном промежутке являются $Z = 102$, 105 и 108; соответствующие числа пазов на один полюс составляют $Z/(2p) = 17$, $17^1/_2$ и 18; первое и последнее — целые и потому нежелательны, следовательно, остается $Z = 105$. Первый частичный шаг петлевой составляющей должен быть равен примерно числу пластин коллектора и секций петлевой составляющей $K = Zu = 315$, деленному на число полюсов: $315/6 = 52^1/_2$, следовательно, нужно принять $y_1 = 52$. Шаг петлевой составляющей по пазам $y_п = y_1/u = 52/3$ не является целым числом, и потому петлевая составляющая будет ступенчатой.

Полный шаг волновой составляющей

$$y = \frac{K \pm a}{p} = \frac{315 \pm 3}{3} = 104 \text{ и } 106;$$

оба эти значения четны, и потому частичные шаги волновой составляющей могут быть одинаковыми — 53 или 52; но так как второе равно шагу петлевой составляющей, то предпочтительно принять его, так как иначе возникнут затруднения с выполнением элементов обмотки.

8.7. СИМВОЛИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ СХЕМ ОБМОТОК

Очень наглядное представление об устройстве обмоток якорей коллекторных машин можно получить следующим образом: схема обмотки, например простой петлевой, предполагается начерченной на поверхности тора, длина окружности которого соответствует одной паре полюсных делений якоря, в виде сетки, причем линии,

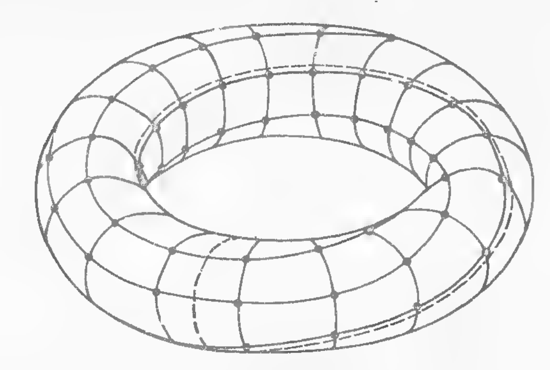


Рис. 8.22. Символическое изображение обмотки якоря на поверхности тора

идущие по окружности этого тора, изображают последовательность секций обмотки, а перпендикулярные к ним кольцевые линии — уравнительные соединения; точки пересечения тех и других соответствуют пластинам коллектора (рис. 8.22).

Если бы линии, идущие по окружности тора, были параллельны его экваториальной плоскости, то каждая из них замыкалась бы после одного обхода окружности; чтобы этого не происходило, они должны иметь определенный наклон к экваториальной плоскости, т. е. обходить поверхность тора по винтовым линиям, замыкающимся в непрерывное целое после числа обходов, равного числу пар полюсов машины.

Далее следует представить поверхность тора разрезанной в одном месте между двумя уравнительными соединениями, вспоротой вдоль одного из промежутков между линиями, изображающими последовательность секций, и развернутой в плоскость. Она представится в виде сетки, состоящей из p параллельных линий, изображающих собственно саму обмотку, и перпендикулярных к ним линий, изображающих уравнительные соединения. На рис. 8.23

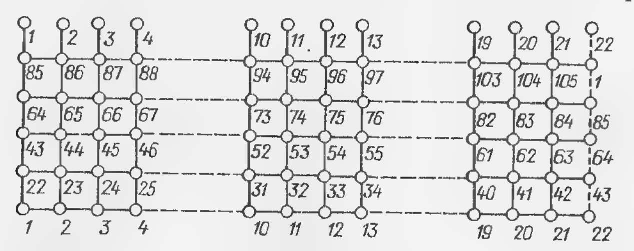


Рис. 8.23. Символическая схема простой петлевой обмотки с полным числом уравнительных соединений

представлен результат такой операции для простой петлевой обмотки со следующими данными: число пар полюсов $p = 5$, число секций и пластин коллектора $K = 105$, число уравнительных соединений полное: $K/p = 21$. Соответственно таким данным схема состоит из пяти горизонтальных линий, пересеченных 21 вертикальными линиями, и содержит 105 точек пересечения тех и других, изображающих пластины коллектора и отмеченных кружками с номерами. В верхней части схемы повторен ряд точек самого нижнего ряда с их номерами; однако они уже не соединены

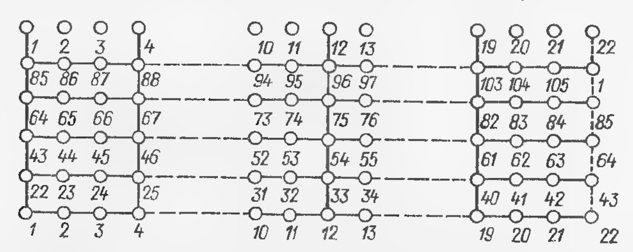


Рис. 8.24. Символическая схема двухходовой однократнозамкнутой петлевой обмотки с числом уравнительных соединений, равным 1/3 полного

между собой горизонтальными линиями, а помещены только для облегчения счета секций или пластин коллектора при переходе с одной горизонтальной линии на другую. То же самое сделано и в правом конце сетки.

Если число уравнительных соединений составляет только часть полного, то часть точек, изображающих пластины коллектора, остаются не соединенными вертикальными линиями. Так, на рис. 8.24 представлено аналогичное построение для двухходовой

однократнозамкнутой петлевой обмотки с теми же общими данными — числом пар полюсов $p = 5$, числом секций и пластин коллектора $K = 105$, но не с полным числом уравнительных соединений, а только с 1/3 его. Однако здесь длина окружности тора должна соответствовать уже не одной, а двум парам полюсных делений, и номера пластин коллектора чередуются через один, так что самый нижний ряд содержит нечетные номера, которые затем переходят в третий снизу ряд, а потом и в пятый; но в середине этого последнего нечетные номера заканчиваются номером 105, за которым следует номер 2, начинающий ряды с четными номерами: из пятого ряда они переходят во второй, а затем в четвертый, в конце которого стоит начало обхода — номер 1.

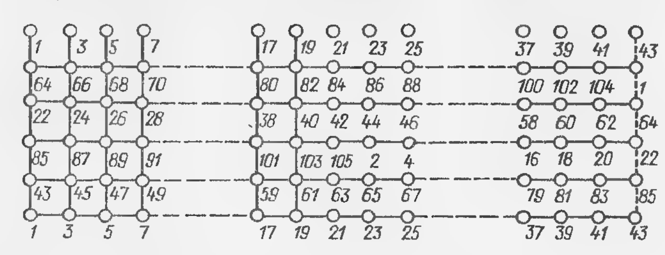


Рис. 8.25. Символическая схема двухходовой однократнозамкнутой петлевой обмотки с числом уравнительных соединений, близким к половине полного

Аналогичным образом может быть построена схема трехходовой однократнозамкнутой обмотки снова с теми же основными данными: $p = 5$ и $K = 105$; но в ней длина окружности будет соответствовать трем парам полюсных делений, а номера пластин будут чередоваться через два, т. е. 1—4—7 и т. д.

Схема двухходовой однократнозамкнутой петлевой обмотки опять с этими же основными данными: $p = 5$ и $K = 105$, но с числом уравнительных соединений, близким к половине полного, дана на рис. 8.25, из которого видно, что соединения заполняют пару полюсных делений подряд, а следующая пара полюсных делений в данном ходе обмотки вовсе их не содержит.

Подобным же образом может быть построена схема комбинированной (лягушечьей) обмотки: ее петлевая составляющая по-прежнему изображается горизонтальными линиями, а волновая, рассматриваемая как система уравнительных соединений первого рода со стороны коллектора, должна изображаться линиями, соединяющими пластины коллектора с заданным шагом; они получаются при этом уже не вертикальными, а наклонными, как показано на рис. 8.26 для обмотки снова с теми же основными данными: $p = 5$ и $K = 105$. В данном случае волновая составляющая является прямоходовой, чему соответствует наклон ее линий справа вниз налево; если бы она была обратноходовой, то их наклон был бы противоположным — слева вниз направо. Данным способом может быть изображена и сложная — двухходовая комби-

нированная — обмотка, и в этом случае длина схемы должна соответствовать не одной, а двум парам полюсных делений, как и для двухходовой однократнозамкнутой петлевой обмотки (см. рис. 8.24 и 8.25).

Волновая обмотка могла бы быть тоже изображена подобным способом, но для простой волновой обмотки это не имеет смысла, а многоходовая изображается как волновая часть комбинированной обмотки.

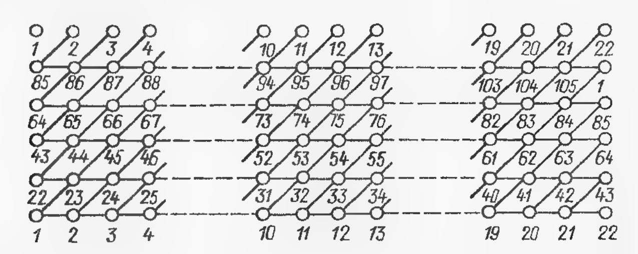


Рис. 8.26. Символическая схема комбинированной обмотки

Двухходовая двукратнозамкнутая петлевая обмотка не может существовать при тех основных данных, что в рассмотренных случаях, потому что число ее секций и пластин коллектора должно быть четным; но порядок построения остается прежним: один из ее ходов может быть построен как для однократнозамкнутой обмотки на длине, соответствующей двум парам полюсных делений. Однако здесь возникает затруднение: во всех построенных схемах уравнительные соединения предполагались со стороны коллектора; их можно было бы изобразить и со стороны, противоположной коллектору, соединяя вертикальными линиями не кружки, изображающие пластины коллектора, а середины отрезков горизонтальных прямых между ними — как бы головки секций; но уравнительные соединения второго или третьего рода придется изображать как петли, связывающие обе системы; во избежание излишнего нагромождения их можно размещать поочередно по разные стороны схемы, что, однако, не следует понимать как указание на их фактическое размещение.

8.8. ВЫБОР ТИПА ОБМОТКИ КОЛЛЕКТОРНОГО ЯКОРЯ

Одним из основных затруднений электромашиностроения в целом является отставание уровня номинальных напряжений от уровня номинальных мощностей, особенно резко проявляющееся в коллекторных машинах. Действительно, если в бесколлекторных машинах переменного тока областью применения низкого напряжения, в основном 220/380 В, следует считать мощности до 300—400 кВт, а начиная примерно с 200 кВт оказывается возможным применять уже высокое напряжение — сразу 6000 В, поскольку применявшиеся ранее напряжения 2000 и 3000 В в настоящее время полностью вышли из употребления, а начиная с мощностей менее 1000 кВт оказывается возможным применение следующей ступени напряжения — 10 000 В, то дальнейшее повышение напряжения для приемников энергии — двигателей, по существу, прекращается.

Оно продолжается для источников энергии — генераторов (и синхронных компенсаторов), для которых начиная с мощностей в несколько десятков тысяч киловатт этот предел напряжения оказывается уже низким, а его удвоение наступает только при мощностях в сотни тысяч киловатт, имея конечным пределом при современном состоянии изоляционной техники всего 25 000—30 000 В. Примеры применения более высоких напряжений ограничиваются единичными исполнениями, не характерными для уровня электромашиностроения в целом.

В области коллекторных машин, в частности машин постоянного тока, отставание уровня напряжений от уровней мощностей еще более значительно. В самом деле, низший предел напряжения — до 220 В находит применение начиная от самых малых мощностей вплоть до сотен, а иногда и тысяч киловатт. Для промежуточного значения напряжения — от 500 до 600 В характерны мощности начиная от нескольких десятков киловатт, особенно в области электрической тяги; но даже для наиболее крупных машин, как прокатные или гребные двигатели с мощностями до 10 000—12 000 кВт в одном якоре, предел напряжения не поднимается практически выше 1000—1200 В и перспективы его преодолеть пока нет.

По сравнению с бесколлекторными машинами переменного тока, для различных разновидностей которых области возможного (и целесообразного) применения обмоток того или иного вида большей частью достаточно очевидны, для коллекторных машин такая очевидность далеко не всегда существует. В частности, для наиболее крупных бесколлекторных машин области применения двух основных разновидностей обмоток — петлевых и волновых — достаточно четко разграничены: петлевые обмотки — для быстроходных машин: турбогенераторов, турбодвигателей и синхронных компенсаторов, и волновые обмотки — для тихоходных машин, главным образом гидрогенераторов, хотя изредка и в них применяются петлевые обмотки. Сомнения могут вызывать тихоходные двигатели, но только до тех пор, пока число витков в секциях равно единице; но как только оно превзойдет ее, волновые обмотки должны уступить место петлевым; впрочем, граница этого лежит при значительных мощностях, осуществляемых достаточно редко.

С обмотками якорей коллекторных машин все обстоит совершенно иначе. Если исключить машины небольшой мощности, но очень высокого напряжения, как, например, некоторые виды генераторов специализированного назначения, применение многовитковых секций, по существу, ограничивается только якорями не-

больших двух- и четырехполюсных машин с проволочной всыпной обмоткой в полузакрытых пазах, для которых волновая обмотка не дает никаких преимуществ. Для четырехполюсного якоря волновая всыпная обмотка при одном и том же числе витков в секциях могла бы дать вдвое большее напряжение, чем петлевая, но именно для всыпных обмоток это не играет особой роли, потому что то же самое может быть достигнуто удвоением числа витков в каждой секции, а впайвание выводов каждой секции в две лежащие рядом пластины коллектора проще, чем в удаленные одна от другой по диаметру коллектора, что повышает возможность ошибок. Дополнительным фактором является возможность выполнения составных секций — двойных, тройных и т. д., необходимого потому, что число пазов небольших якорей мало и число пластин коллектора должно быть в несколько раз бо́льшим по условию напряжения между соседними пластинами. Такой состав секций может быть выполнен либо намоткой секций несколькими параллельными проводниками сразу, либо автоматическим выпуском петли для выводов секций после наматывания определенного числа витков. Поскольку такие обмотки равносекционны, возможность ошибок при впаивании выводов секций в пластины коллектора в последнем случае полностью исключается.

Еще в § 8.1 было отмечено, что область применения секций из проводника прямоугольного сечения для якорей коллекторных машин начинается со значительно меньших мощностей, чем для бесколлекторных. Из такого проводника могут быть намотаны и многовитковые секции, что допускает многочисленные формы их исполнения, описываемые обычно в руководствах по обмоткам, особенно относящихся к первой четверти текущего века; однако применение таких форм сильно осложняет выполнение обмоток и ухудшает условия коммутации и потому не может быть рекомендовано — во всех отношениях целесообразнее применение одновитковых секций. В этих условиях все преимущества у волновой обмотки, позволяющей получать при прочих равных условиях вдвое большее напряжение, нечувствительной к погрешностям сборки машины и не нуждающейся в уравнительных соединениях. Все это и определило широкое распространение волновых обмоток для машин сравнительно небольшой мощности, но уже достаточной для отхода от всыпных обмоток.

Простые волновые обмотки применяются довольно широко; ими снабжаются машины с мощностями главным образом в десятки киловатт, особенно быстроходные; однако строго разграничить области применения простых волновой и петлевой обмоток было бы очень трудно — в достаточно широком интервале мощностей они практически равноценны.

Одной из типичных областей применения сложных волновых обмоток являются относительно тихоходные машины средних мощностей с не очень высокими пределами напряжения, как, например, возбудители для гидрогенераторов, в которых трудно добиться

равномерности зазора между полюсами и якорем при различных положениях вала. В этих машинах число ходов может быть и больше двух.

Простая петлевая обмотка является наиболее часто применяемой в широком диапазоне машин средней и крупной мощности; при этом число уравнителей первого рода возрастает с мощностью машины и в наиболее крупных доходит до полного возможного; однако такие машины уже находятся на границе применения сложных петлевых обмоток — двухходовых однократнозамкнутых или двукратнозамкнутых, а в последнее время и трехходовых трехкратнозамкнутых. При этом все более широкое распространение находят уравнительные соединения в петушках, заменяющие соединения всех родов.

Выбор между сложными петлевыми и комбинированными обмотками в значительной степени определяется не столько техническими преимуществами той или иной формы, сколько условиями, сложившимися на том или ином электромашиностроительном предприятии, и потому не имеет однозначного решения.

Во всяком случае на выбор той или иной формы обмотки в сильной степени влияют условия расчета электрической машины, для которой предназначается эта обмотка, что, однако, далеко выходит за пределы данной книги.

Приложение 1

КОЭФФИЦИЕНТЫ УКОРОЧЕНИЯ ШАГА ДЛЯ ЧИСЕЛ ПАЗОВ НА ПОЛЮС Q, КРАТНЫХ ТРЕМ, И РАЗЛИЧНЫХ ШАГОВ y

Число пазов на полюс Q											$\beta = \frac{y}{Q}$	$90\beta^\circ$	k_y
36	33	30	27	24	21	18	15	12	9	6			
35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,9722	87,50	0,9990
—	32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,9697	87,27	0,9989
—	—	29	—	—	—	—	—	—	—	—	0,9667	87,00	0,9986
—	—	—	26	—	—	—	—	—	—	—	0,9630	86,67	0,9983
—	—	—	—	23	—	—	—	—	—	—	0,9583	86,25	0,9979
—	—	—	—	—	20	—	—	—	—	—	0,9524	85,71	0,9972
34	—	—	—	—	—	17	—	—	—	—	0,9444	85,00	0,9962
—	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,9394	84,55	0,9955
—	—	28	—	—	—	—	14	—	—	—	0,9333	84,00	0,9945
—	—	—	25	—	—	—	—	—	—	—	0,9259	83,33	0,9932
33	—	—	—	22	—	—	—	11	—	—	0,9167	82,50	0,9914
—	30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,9091	81,82	0,9898
—	—	—	—	—	19	—	—	—	—	—	0,9048	81,43	0,9888
—	—	27	—	—	—	—	—	—	—	—	0,9000	81,00	0,9877
32	—	—	24	—	—	16	—	—	8	—	0,8889	80,00	0,9848
—	29	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,8788	79,09	0,9819
—	—	—	—	21	—	—	—	—	—	—	0,8750	78,75	0,9808
—	—	26	—	—	—	—	13	—	—	—	0,8667	78,00	0,9781
31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,8611	77,50	0,9763
—	—	—	—	—	18	—	—	—	—	—	0,8571	77,14	0,9749
—	—	—	23	—	—	—	—	—	—	—	0,8519	76,67	0,9730
—	28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,8485	76,36	0,9718
30	—	25	—	20	—	15	—	10	—	5	0,8333	75,00	0,9659
—	27	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,8182	73,64	0,9595
—	—	—	22	—	—	—	—	—	—	—	0,8148	73,33	0,9580
—	—	—	—	—	17	—	—	—	—	—	0,8095	72,86	0,9556
29	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,8056	72,50	0,9537
—	—	24	—	—	—	—	12	—	—	—	0,8000	72,00	0,9511
—	—	—	—	19	—	—	—	—	—	—	0,7917	71,25	0,9469
—	26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,7879	70,91	0,9450
28	—	—	21	—	—	14	—	—	7	—	0,7778	70,00	0,9397
—	—	23	—	—	—	—	—	—	—	—	0,7667	69,00	0,9335
—	—	—	—	—	16	—	—	—	—	—	0,7619	68,57	0,9309
—	25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,7576	68,18	0,9284
27	—	—	—	18	—	—	—	9	—	—	0,7500	67,50	0,9239
—	—	—	20	—	—	—	—	—	—	—	0,7407	66,67	0,9182
—	—	22	—	—	—	—	11	—	—	—	0,7333	66,00	0,9135
—	24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,7273	65,45	0,9096
26	—	—	—	—	—	13	—	—	—	—	0,7222	65,00	0,9063
—	—	—	—	—	15	—	—	—	—	—	0,7143	64,29	0,9010
—	—	—	—	17	—	—	—	—	—	—	0,7083	63,75	0,8969
—	—	—	19	—	—	—	—	—	—	—	0,7037	63,33	0,8936
—	—	21	—	—	—	—	—	—	—	—	0,7000	63,00	0,8910
—	23	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,6970	62,73	0,8888
25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,6944	62,50	0,8870
24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	0,6667	60,00	0,8660

Продолжение приложения 1

Число пазов на полюс Q											$\beta = \frac{y}{Q}$	$90\beta^\circ$	k_y
36	33	30	27	24	21	18	15	12	9	6			
23	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,6389	57,50	0,8434
—	21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,6364	57,27	0,8413
—	—	19	—	—	—	—	—	—	—	—	0,6333	57,00	0,8387
—	—	—	17	—	—	—	—	—	—	—	0,6296	56,67	0,8355
—	—	—	—	15	—	—	—	—	—	—	0,6250	56,25	0,8315
—	—	—	—	—	13	—	—	—	—	—	0,6190	55,71	0,8262
22	—	—	—	—	—	11	—	—	—	—	0,6111	55,00	0,8192
—	20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,6061	54,55	0,8146
—	—	18	—	—	—	—	9	—	—	—	0,6000	54,00	0,8090
—	—	—	16	—	—	—	—	—	—	—	0,5926	53,33	0,8021
21	—	—	—	14	—	—	—	7	—	—	0,5833	52,50	0,7934
—	19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,5758	51,82	0,7861
—	—	—	—	—	12	—	—	—	—	—	0,5714	51,43	0,7818
—	—	17	—	—	—	—	—	—	—	—	0,5667	51,00	0,7771
20	—	—	15	—	—	10	—	—	5	—	0,5556	50,00	0,7660
—	18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,5455	49,09	0,7557
—	—	—	—	13	—	—	—	—	—	—	0,5417	48,75	0,7518
—	—	16	—	—	—	—	8	—	—	—	0,5333	48,00	0,7431
19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,5278	47,50	0,7373
—	—	—	—	—	11	—	—	—	—	—	0,5238	47,14	0,7331
—	—	—	14	—	—	—	—	—	—	—	0,5185	46,67	0,7274
—	17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,5152	46,36	0,7237
18	—	15	—	12	—	9	—	6	—	3	0,5000	45,00	0,7071
—	16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,4848	43,64	0,6901
—	—	—	13	—	—	—	—	—	—	—	0,4815	43,33	0,6862
—	—	—	—	—	10	—	—	—	—	—	0,4762	42,86	0,6802
17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,4722	42,50	0,6756
—	—	14	—	—	—	—	7	—	—	—	0,4667	42,00	0,6691
—	—	—	—	11	—	—	—	—	—	—	0,4583	41,25	0,6593
—	15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,4545	40,91	0,6549
16	—	—	12	—	—	8	—	—	4	—	0,4444	40,00	0,6428
—	—	13	—	—	—	—	—	—	—	—	0,4333	39,00	0,6293
—	—	—	—	—	9	—	—	—	—	—	0,4286	38,57	0,6235
—	14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,4242	38,18	0,6182
15	—	—	—	10	—	—	—	5	—	—	0,4167	37,50	0,6088
—	—	—	11	—	—	—	—	—	—	—	0,4074	36,67	0,5972
—	—	12	—	—	—	—	6	—	—	—	0,4000	36,00	0,5878
—	13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,3939	35,45	0,5801
14	—	—	—	—	—	7	—	—	—	—	0,3889	35,00	0,5736
—	—	—	—	—	8	—	—	—	—	—	0,3810	34,29	0,5633
—	—	—	—	9	—	—	—	—	—	—	0,3750	33,75	0,5556
—	—	—	10	—	—	—	—	—	—	—	0,3704	33,33	0,5495
—	—	11	—	—	—	—	—	—	—	—	0,3667	33,00	0,5446
—	12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,3636	32,73	0,5406
13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,3611	32,50	0,5373
12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	0,3333	30,00	0,5000

Окончание приложения 1

Число пазов на полюс Q											$\beta = \frac{y}{Q}$	90β°	k_y
36	33	30	27	24	21	18	15	12	9	6			
11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,3056	27,50	0,4617
—	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,3030	27,27	0,4582
—	—	9	—	—	—	—	—	—	—	—	0,3000	27,00	0,4540
—	—	—	8	—	—	—	—	—	—	—	0,2963	26,67	0,4488
—	—	—	—	7	—	—	—	—	—	—	0,2917	26,25	0,4423
—	—	—	—	—	6	—	—	—	—	—	0,2857	25,71	0,4339
10	—	—	—	—	—	5	—	—	—	—	0,2778	25,00	0,4226
—	9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,2727	24,55	0,4154
—	—	8	—	—	—	—	4	—	—	—	0,2667	24,00	0,4067
—	—	—	7	—	—	—	—	—	—	—	0,2593	23,33	0,3961
9	—	—	—	6	—	—	—	3	—	—	0,2500	22,50	0,3827
—	8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,2424	21,82	0,3717
—	—	—	—	—	5	—	—	—	—	—	0,2381	21,43	0,3653
—	—	7	—	—	—	—	—	—	—	—	0,2333	21,00	0,3584
8	—	—	6	—	—	4	—	—	2	—	0,2222	20,00	0,3420
—	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,2121	19,09	0,3271
—	—	—	—	5	—	—	—	—	—	—	0,2083	18,75	0,3214
—	—	6	—	—	—	—	3	—	—	—	0,2000	18,00	0,3090
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,1944	17,50	0,3007
—	—	—	—	—	4	—	—	—	—	—	0,1905	17,14	0,2948
—	—	—	5	—	—	—	—	—	—	—	0,1852	16,67	0,2868
—	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,1818	16,36	0,2817
6	—	5	—	4	—	3	—	2	—	1	0,1667	15,00	0,2588

Число пазов на полюс Q											$\beta = \frac{y}{Q}$	90β°	k_y
36	33	30	27	24	21	18	15	12	9	6			
—	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,1515	13,64	0,2358
—	—	—	4	—	—	—	—	—	—	—	0,1481	13,33	0,2306
—	—	—	—	—	3	—	—	—	—	—	0,1429	12,86	0,2225
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,1389	12,50	0,2164
—	—	4	—	—	—	—	2	—	—	—	0,1333	12,00	0,2079
—	—	—	—	3	—	—	—	—	—	—	0,1250	11,25	0,1951
—	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,1212	10,91	0,1893
4	—	—	3	—	—	2	—	—	1	—	0,1111	10,00	0,1736
—	—	3	—	—	—	—	—	—	—	—	0,1000	9,00	0,1564
—	—	—	—	—	2	—	—	—	—	—	0,0952	8,57	0,1490
—	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,0909	8,18	0,1423
3	—	—	—	2	—	—	—	1	—	—	0,0833	7,50	0,1305
—	—	—	2	—	—	—	—	—	—	—	0,0741	6,67	0,1161
—	—	2	—	—	—	—	1	—	—	—	0,0667	6,00	0,1045
—	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,0606	5,45	0,0951
2	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	0,0556	5,00	0,0872
—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	0,0476	4,29	0,0747
—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	0,0417	3,75	0,0654
—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	0,0370	3,33	0,0581
—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	0,0333	3,00	0,0523
—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,0303	2,73	0,0476
1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,0278	2,50	0,0436

Приложение 2

КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛАДКИХ ОБМОТОК ОДНОФАЗНОГО ТОКА

Порядок ν	Относительная часть γ полюсного деления, занятая обмоткой									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1	0,9959	0,9836	0,9634	0,9355	0,9003	0,8584	0,8103	0,7568	0,6986	0,6366
2	0,9836	0,9355	0,8584	0,7568	0,6366	0,5046	0,3679	0,2339	0,1093	0
3	0,9634	0,8584	0,6986	0,5046	0,3001	0,1093	—0,0474	—0,1559	—0,2101	—0,2122
4	0,9355	0,7568	0,5046	0,2339	0	—0,1559	—0,2162	—0,1892	—0,1039	0
5	0,9003	0,6366	0,3001	0	—0,1801	—0,2122	—0,1286	0	0,1000	0,1273
6	0,8584	0,5046	0,1093	—0,1559	—0,2122	—0,1039	0,0468	0,1261	0,0954	0
7	0,8103	0,3679	—0,0474	—0,2162	—0,1286	0,0468	0,1283	0,0668	—0,0459	—0,0909
8	0,7568	0,2339	—0,1559	—0,1892	0	0,1261	0,0668	—0,0585	—0,0841	0
9	0,6986	0,1093	—0,2101	—0,1039	0,1000	0,0954	—0,0459	—0,0841	0,0123	0,0707
10	0,6366	0	—0,2122	0	0,1273	0	—0,0909	0	0,0707	0
11	0,5716	—0,0894	—0,1719	0,0850	0,0818	—0,0780	—0,0375	0,0688	0,0101	—0,0579
12	0,5046	—0,1559	—0,1039	0,1261	0	—0,0841	0,0445	0,0390	—0,0561	0
13	0,4363	—0,1981	—0,0255	0,1164	—0,0693	—0,0252	0,0691	—0,0360	—0,0247	0,0490
14	0,3679	—0,2162	0,0468	0,0668	—0,0909	0,0445	0,0201	—0,0541	0,0409	0
15	0,3001	—0,2122	0,1000	0	—0,0600	0,0707	—0,0429	0	0,0333	—0,0424
16	0,2339	—0,1892	0,1261	—0,0585	0	0,0396	—0,0541	0,0473	—0,0260	0
17	0,1700	—0,1515	0,1233	—0,0890	0,0530	—0,0193	—0,0084	0,0275	—0,0371	0,0375
18	0,1093	—0,1039	0,0954	—0,0841	0,0707	—0,0561	0,0409	—0,0260	0,0121	0
19	0,0524	—0,0518	0,0507	—0,0492	0,0474	—0,0452	0,0426	—0,0398	0,0368	—0,0335
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Приложение 3

КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБМОТОК ОДНОФАЗНОГО ТОКА С ЗАПОЛНЕНИЕМ 2/3 ЧИСЛА ПАЗОВ НА ПОЛЮС

Порядок ν	Число заполненных обмоткой пазов q/Общее число пазов на полюс Q										Гладкая обмотка
	2/3	4/6	6/9	8/12	10/15	12/18	14/21	16/24	18/27	20/30	
1	0,8660	0,8365	0,8312	0,8294	0,8285	0,8280	0,8278	0,8276	0,8275	0,8274	0,8270
2	0,5000	0,4330	0,4220	0,4183	0,4165	0,4156	0,4150	0,4147	0,4144	0,4143	0,4135
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	—0,5000	—0,2500	—0,2245	—0,2165	—0,2129	—0,2110	—0,2099	—0,2091	—0,2086	—0,2083	—0,2067
5	—0,8660	—0,2241	—0,1884	—0,1778	—0,1732	—0,1708	—0,1693	—0,1684	—0,1678	—0,1673	—0,1654
6	—1,0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	—0,8660	0,2241	0,1536	0,1365	0,1294	0,1258	0,1237	0,1224	0,1215	0,1208	0,1181
8	—0,5000	0,2500	0,1466	0,1250	0,1165	0,1123	0,1098	0,1083	0,1072	0,1065	0,1034
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0,5000	—0,4330	—0,1466	—0,1121	—0,1000	—0,0942	—0,0909	—0,0889	0,0876	—0,0866	—0,0827
11	0,8660	—0,8365	—0,1536	—0,1092	—0,0948	—0,0881	—0,0844	—0,0821	—0,0806	—0,0795	—0,0752
12	1,0000	—1,0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0,8660	—0,8365	0,1884	0,1092	0,0885	0,0796	0,0749	0,0720	0,0701	0,0688	0,0636
14	0,5000	—0,4330	0,2245	0,1121	0,0871	0,0768	0,0714	0,0682	0,0661	0,0647	0,0591
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	—0,5000	0,2500	—0,4220	—0,1250	—0,0871	—0,0733	—0,0665	—0,0625	—0,6000	—0,0583	—0,0517
17	—0,8660	0,2241	—0,8312	—0,1365	—0,0885	—0,0724	—0,0647	—0,0604	—0,0576	—0,0557	—0,0486
18	—1,0000	0	—1,0000	0	0	0	0	0	0	0	0
19	—0,8660	—0,2241	—0,8312	0,1778	0,0948	0,0724	0,0626	0,0572	0,0538	0,0516	0,0435
20	—0,5000	—0,2500	—0,4220	0,2165	0,1000	0,0733	0,0620	0,0560	0,0524	0,0500	0,0413
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0,5000	0,4330	0,2245	—0,4183	—0,1165	—0,0768	—0,0620	—0,0546	—0,0502	—0,0474	—0,0376
23	0,8660	0,8365	0,1884	—0,8294	—0,1294	—0,0796	—0,0626	—0,0542	—0,0494	—0,0464	—0,0360
24	1,0000	1,0000	0	—1,0000	0	0	0	0	0	0	0
25	0,8660	0,8365	—0,1536	—0,8294	0,1732	0,0881	0,0647	0,0542	0,0484	0,0448	0,0331
26	0,5000	0,4330	—0,1466	—0,4183	0,2129	0,0942	0,0665	0,0546	0,0482	0,0443	0,0318
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	—0,5000	—0,2500	0,1466	0,2165	—0,4165	—0,1123	—0,0714	—0,0560	—0,0482	—0,0435	—0,0295
29	—0,8660	—0,2241	0,1536	0,1778	—0,8285	—0,1258	—0,0749	—0,0572	—0,0484	—0,0434	—0,0285
30	—1,0000	0	0	0	—1,0000	0	0	0	0	0	0

Приложение 4

КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБМОТОК ДВУХФАЗНОГО ТОКА

Порядок ν	Число пазов на полюс и фазу q									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	∞
1	0,9239	0,9107	0,9061	0,9041	0,9029	0,9022	0,9018	0,9015	0,9012	0,9003
2	0,7071	0,6667	0,6533	0,6472	0,6440	0,6420	0,6407	0,6399	0,6392	0,6366
3	0,3827	0,3333	0,3182	0,3115	0,3080	0,3058	0,3045	0,3036	0,3029	0,3001
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	—0,3827	—0,2440	—0,2126	—0,2000	—0,1936	—0,1899	—0,1875	—0,1859	—0,1843	—0,1801
6	—0,7071	—0,3333	—0,2706	—0,2472	—0,2357	—0,2291	—0,2250	—0,2222	—0,2203	—0,2122
7	—0,9239	—0,2440	—0,1802	—0,1587	—0,1485	—0,1429	—0,1393	—0,1370	—0,1353	—0,1286
8	—1,0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	—0,9239	0,2333	0,1802	0,1432	0,1276	0,1193	0,1143	0,1111	0,1089	0,1000
10	—0,7071	0,6667	0,2706	0,2000	0,1725	0,1586	0,1503	0,1450	0,1414	0,1273
11	—0,3827	0,9107	0,2126	0,1432	0,1189	0,1070	0,1002	0,0959	0,0930	0,0618
12	0	1,0000	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0,3827	0,9107	—0,3182	—0,1587	—0,1189	—0,1017	—0,0924	—0,0867	—0,0829	—0,0693
14	0,7071	0,6667	—0,6533	—0,2472	—0,1725	—0,1429	—0,1274	—0,1182	—0,1122	—0,0909
15	0,9239	0,3333	—0,9061	—0,2000	—0,1276	—0,1017	—0,0888	—0,0813	—0,0765	—0,0600
16	1,0000	0	—1,0000	0	0	0	0	0	0	0
17	0,9239	—0,2440	—0,9061	0,3115	0,1485	0,1070	0,0888	0,0789	0,0727	0,0530
18	0,7071	—0,3333	—0,6533	0,6472	0,2357	0,1586	0,1274	0,1111	0,1012	0,0707
19	0,3827	—0,2440	—0,3182	0,9041	0,1936	0,1193	0,0924	0,0789	0,0709	0,0474
20	0	0	0	1,0000	0	0	0	0	0	0

Приложение 5

КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Порядок ν	Число пазов на полюс и фазу q										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	∞
1	0,9659	0,9598	0,9577	0,9567	0,9561	0,9558	0,9556	0,9555	0,9554	0,9553	0,9552	0,9549
2	0,8660	0,8440	0,8365	0,8331	0,8312	0,8301	0,8294	0,8289	0,8285	0,8283	0,8280	0,8270
3	0,7071	0,6667	0,6533	0,6472	0,6440	0,6420	0,6407	0,6399	0,6392	0,6388	0,6384	0,6366
4	0,5000	0,4491	0,4330	0,4258	0,4220	0,4197	0,4183	0,4173	0,4165	0,4160	0,4156	0,4135
5	0,2588	0,2176	0,2053	0,2000	0,1972	0,1955	0,1944	0,1937	0,1932	0,1928	0,1925	0,1910
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	—0,2588	—0,1774	—0,1576	—0,1494	—0,1453	—0,1429	—0,1413	—0,1403	—0,1395	—0,1390	—0,1386	—0,1364
8	—0,5000	—0,2931	—0,2500	—0,2331	—0,2245	—0,2196	—0,2165	—0,2144	—0,2129	—0,2118	—0,2110	—0,2067
9	—0,7071	—0,3333	—0,2706	—0,2472	—0,2357	—0,2291	—0,2250	—0,2222	—0,2203	—0,2188	—0,2178	—0,2122
10	—0,8660	—0,2931	—0,2241	—0,2000	—0,1884	—0,1819	—0,1778	—0,1751	—0,1732	—0,1718	—0,1708	—0,1654
11	—0,9659	—0,1774	—0,1261	—0,1095	—0,1017	—0,0974	—0,0948	—0,0930	—0,0918	—0,0909	—0,0902	—0,0868
12	—1,0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	—0,9659	0,2176	0,1261	0,1022	0,0919	0,0865	0,0831	0,0810	0,0795	0,0784	0,0775	0,0735
14	—0,8660	0,4491	0,2241	0,1742	0,1536	0,1429	0,1365	0,1323	0,1294	0,1274	0,1258	0,1181
15	—0,7071	0,6667	0,2706	0,2000	0,1725	0,1585	0,1503	0,1450	0,1414	0,1388	0,1369	0,1273
16	—0,5000	0,8440	0,2500	0,1742	0,1466	0,1329	0,1250	0,1200	0,1165	0,1141	0,1123	0,1034
17	—0,2588	0,9598	0,1576	0,1022	0,0837	0,0747	0,0697	0,0665	0,0643	0,0828	0,0617	0,0562
18	0	1,0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Окончание приложения 5

Порядок ν	Число пазов на полюс и фазу q										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	∞
19	0,2588	0,9598	—0,2053	—0,1095	—0,0837	—0,0722	—0,0660	—0,0622	—0,0596	—0,0578	—0,0565	—0,0503
20	0,5000	0,8440	—0,4330	—0,2000	—0,1466	—0,1241	—0,1121	—0,1048	—0,1000	—0,0967	—0,0942	—0,0827
21	0,7071	0,6667	—0,6533	—0,2472	—0,1725	—0,1429	—0,1274	—0,1182	—0,1122	—0,1081	—0,1050	—0,0909
22	0,8660	0,4491	—0,8365	—0,2331	—0,1536	—0,1241	—0,1092	—0,1004	—0,0948	—0,0909	—0,0881	—0,0752
23	0,9659	0,2176	—0,9577	—0,1494	—0,0919	—0,0722	—0,0626	—0,0571	—0,0536	—0,0511	—0,0494	—0,0415
24	1,0000	0	—1,0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0,9659	—0,1774	—0,9577	0,2000	0,1017	0,0747	0,0626	0,0559	0,0518	0,0490	0,0470	0,0382
26	0,8660	—0,2931	—0,8365	0,4258	0,1884	0,1329	0,1092	0,0964	0,0885	0,0833	0,0796	0,0636
27	0,7071	—0,3333	—0,6533	0,6472	0,2357	0,1585	0,1274	0,1111	0,1012	0,0947	0,0902	0,0707
28	0,5000	—0,2931	—0,4430	0,8331	0,2245	0,1429	0,1121	0,0964	0,0871	0,0810	0,0768	0,0591
29	0,2588	—0,1774	—0,2053	0,9567	0,1453	0,0865	0,0660	0,0559	0,0501	0,0463	0,0437	0,0329
30	0	0	0	1,0000	0	0	0	0	0	0	0	0
31	—0,2588	0,2176	0,1576	0,9567	—0,1972	—0,0974	—0,0697	—0,0571	—0,0501	—0,0457	—0,0427	—0,0308
32	—0,5000	0,4491	0,2500	0,8331	—0,4220	—0,1819	—0,1250	—0,1004	—0,0871	—0,0788	—0,0733	—0,0517
33	—0,7071	0,6667	0,2706	0,6472	—0,6440	—0,2291	—0,1503	—0,1182	—0,1012	—0,0909	—0,0841	—0,0597
34	—0,8660	0,8440	0,2241	0,4258	—0,8312	—0,2196	—0,1365	—0,1048	—0,0885	—0,0788	—0,0724	—0,0486
35	—0,9659	0,9598	0,1261	0,2000	—0,9561	—0,1429	—0,0831	—0,0622	—0,0518	—0,0457	—0,0417	—0,0273
36	—1,0000	1,0000	0	0	—1,0000	0	0	0	0	0	0	0

Приложение 6

КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБМОТОК ШЕСТИФАЗНОГО ТОКА

Порядок ν	Число пазов на полюс и фазу q					
	2	3	4	5	6	∞
1	0,9914	0,9898	0,9893	0,9891	0,9889	0,9886
2	0,9659	0,9598	0,9577	0,9567	0,9561	0,9549
3	0,9239	0,9107	0,9061	0,9040	0,9029	0,9003
4	0,8660	0,8440	0,8365	0,8331	0,8312	0,8270
5	0,7933	0,7619	0,7512	0,7464	0,7438	0,7379
6	0,7071	0,6667	0,6533	0,6472	0,6440	0,6366
7	0,6088	0,5613	0,5460	0,5391	0,5354	0,5271
8	0,5000	0,4491	0,4330	0,4258	0,4220	0,4135
9	0,3827	0,3333	0,3256	0,3115	0,3080	0,3001
10	0,2588	0,2176	0,2053	0,2000	0,1972	0,1910
11	0,1305	0,1053	0,0981	0,0950	0,0934	0,0899
12	0	0	0	0	0	0
13	—0,1305	—0,0952	—0,0861	—0,0823	—0,0803	—0,0760
14	—0,2588	—0,1774	—0,1576	—0,1494	—0,1453	—0,1364
15	—0,3827	—0,2440	—0,2126	—0,2000	—0,1936	—0,1801
16	—0,5000	—0,2931	—0,2500	—0,2331	—0,2245	—0,2067
17	—0,6088	—0,3307	—0,2692	—0,2486	—0,2383	—0,2170
18	—0,7071	—0,3333	—0,2706	—0,2472	—0,2357	—0,2123
19	—0,7933	—0,3307	—0,2550	—0,2328	—0,2184	—0,1942
20	—0,8660	—0,2931	—0,2241	—0,2000	—0,1884	—0,1654
21	—0,9239	—0,2440	—0,1802	—0,1587	—0,1485	—0,1286
22	—0,9659	—0,1774	—0,1261	—0,1095	—0,1017	—0,0868
23	—0,9914	—0,0952	—0,0648	—0,0554	—0,0511	—0,0430
24	—1,0000	0	0	0	0	0
25	—0,9914	0,1053	0,0648	0,0536	0,0486	0,0395
26	—0,9659	0,2176	0,1261	0,1022	0,0919	0,0737
27	—0,9239	0,3333	0,1802	0,1431	0,1276	0,1000
28	—0,8660	0,4491	0,2241	0,1742	0,1613	0,1181
29	—0,7933	0,5613	0,2550	0,1935	0,1688	0,1272
30	—0,7071	0,6667	0,2706	0,2000	0,1725	0,1273
31	—0,6088	0,7619	0,2692	0,1935	0,1649	0,1190
32	—0,5000	0,8440	0,2500	0,1742	0,1465	0,1034
33	—0,3827	0,9107	0,2126	0,1431	0,1189	0,0818
34	—0,2588	0,9598	0,1576	0,1022	0,0837	0,0562
35	—0,1305	0,9898	0,0861	0,0536	0,0432	0,0282
36	0	1,0000	0	0	0	0

Приложение 7

КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНОГО ТОКА С ОДНИМ ОТСТАВЛЕННЫМ ПАЗОМ С КАЖДОЙ СТОРОНЫ

Порядок ν	Число пазов на полюс и фазу q				
	3	5	7	9	11
1	0,8440	0,9150	0,9345	0,9426	0,9467
3	0	0,4000	0,5148	0,5627	0,5871
5	—0,2931	0	0,0911	0,1300	0,1499
7	0,4491	0,1181	0	—0,0523	—0,0795
9	1,0000	0,4000	0,1272	0	—0,0683
11	0,4491	—0,2559	—0,1120	—0,0397	0
13	—0,2931	—0,2890	—0,1410	—0,0715	—0,0271
15	0	—0,6000	—0,3563	—0,1954	—0,0993
17	0,8440	—0,2890	—0,1997	—0,1162	—0,0688
19	0,8440	—0,2559	0,2103	0,1364	0,0851
21	0	0,4000	0,4286	0,2994	0,1978
23	—0,2931	0,1181	0,2103	0,1591	0,1105
25	0,4491	0	—0,1997	—0,1648	—0,1198
27	1,0000	0,4000	—0,3563	—0,3333	—0,2542
29	0,4491	0,9150	—0,1410	—0,1648	—0,1322
31	—0,2931	0,9150	—0,1120	0,1591	0,1353
33	0	0,4000	0,1272	0,2994	0,2727

Приложение 8

КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНОГО ТОКА С ДВУМЯ ОТСТАВЛЕННЫМИ ПАЗАМИ С КАЖДОЙ СТОРОНЫ

Порядок ν	Число пазов на полюс и фазу q			
	5	7	9	11
1	0,8331	0,8922	0,9169	0,9294
3	0	0,2857	0,4176	0,4877
5	—0,2000	—0,0619	0,0235	0,0737
7	0,1742	0,1429	0,0686	0,0140
9	0	0,2857	0,1111	0,1301
11	0,1742	0,0807	0,1158	0,1818
13	—0,2000	—0,0541	—0,0893	—0,0961
15	0	0,2857	—0,0772	—0,1671
17	—0,2000	0,2529	—0,0279	—0,0563
19	0,1742	—0,3297	—0,1008	0,0177
21	0	—0,7143	—0,3405	—0,0563
23	0,1742	—0,3297	—0,2273	—0,0770
25	—0,2000	0,2529	0,2648	0,1245
27	0	0,2857	0,5556	0,3329
29	0,8331	—0,0541	0,2648	0,1993
31	0,8331	0,0807	—0,2273	—0,2201
33	0	0,2857	—0,3405	—0,4545

Приложение 9

ОБМОТОЧНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ОДНОСЛОЙНЫХ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНОГО ТОКА С РАЗЛИЧНЫМИ УКОРОЧЕНИЯМИ ШАГА

Шаг y	Число пазов на полюс и фазу q										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	0,7071	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	0,9659	0,7352	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	0,9019	0,7763	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	0,9598	0,8924	0,7740	0,6787	—	—	—	—	—	—
11	—	—	0,9577	0,8740	0,7862	—	—	—	—	—	—
13	—	—	—	0,9358	0,8699	—	—	—	—	—	—
15	—	—	—	0,9567	0,9271	0,8612	—	—	—	—	—
17	—	—	—	—	0,9561	0,9134	0,8589	—	—	—	—
19	—	—	—	—	—	0,9451	0,9068	0,8538	—	—	—
21	—	—	—	—	—	—	0,9393	0,8978	—	—	—
23	—	—	—	—	—	—	—	0,9297	0,8931	—	—
25	—	—	—	—	—	—	—	—	0,9241	0,8869	—
27	—	—	—	—	—	—	—	—	0,9449	0,9166	0,8834
29	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,9380	0,9119
31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,9335

Приложение 10

ОБМОТОЧНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ДВУХСЛОЙНЫХ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНОГО ТОКА С РАЗЛИЧНЫМИ УКОРОЧЕНИЯМИ ШАГА

Шаг y	Число пазов на полюс и фазу q										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	0,6830	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	0,8365	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	0,9330	0,7352	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	0,9659	0,8312	0,6772	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	0,9019	0,7598	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	0,9452	0,8294	0,7109	—	—	—	—	—	—	—
9	—	0,9598	0,8848	0,7740	0,6761	—	—	—	—	—	—
10	—	—	0,9250	0,8285	0,7324	—	—	—	—	—	—
11	—	—	0,9495	0,8740	0,7832	—	—	—	—	—	—
12	—	—	0,9576	0,9099	0,8280	—	—	—	—	—	—
13	—	—	—	0,9358	0,8666	—	—	—	—	—	—
14	—	—	—	0,9514	0,8985	—	—	—	—	—	—
15	—	—	—	0,9567	0,9236	—	—	—	—	—	—
16	—	—	—	—	0,9416	0,8897	—	—	—	—	—
17	—	—	—	—	0,9525	0,9134	—	—	—	—	—
18	—	—	—	—	0,9561	0,9319	0,8829	—	—	—	—
19	—	—	—	—	—	0,9451	0,9053	—	—	—	—
20	—	—	—	—	—	—	0,9231	—	—	—	—
21	—	—	—	—	—	—	0,9370	0,8978	—	—	—
22	—	—	—	—	—	—	—	0,9153	—	—	—
23	—	—	—	—	—	—	—	0,9297	0,8919	—	—
24	—	—	—	—	—	—	—	0,9410	0,9086	—	—
25	—	—	—	—	—	—	—	—	0,9228	—	—
26	—	—	—	—	—	—	—	—	0,9345	0,9028	—
27	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,9166	—
28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,9284	0,8976
29	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,9380	0,9110
30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,9227
31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,9326

Приложение 11

ОБМОТОЧНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ОБМОТОК ШЕСТИФАЗНОГО ТОКА С РЕАЛЬНО ПРИМЕНИМЫМИ УКОРОЧЕНИЯМИ ШАГА

Порядок ν	Число пазов на полюс и фазу q							
	2	3	3	4	5	5	6	∞
	Укорочение шага β							
	11/12	17/18	8/9	11/12	14/15	9/10	11/12	11/12
1	0,9830	0,9861	0,9748	0,9809	0,9836	0,9769	0,9805	0,9802
3	0,8536	0,8797	0,7887	0,8372	0,8598	0,8055	0,8342	0,8318
5	0,6294	0,6905	0,4897	0,5960	0,6466	0,5278	0,5901	0,5854
7	0,3706	0,4598	0,1920	0,3324	0,4006	0,2447	0,3259	0,3209
9	0,1464	0,2357	0	0,1218	0,1831	0,0487	0,1179	0,1148
11	0,0170	0,0604	—0,0360	0,0128	0,0387	—0,0149	0,0122	0,0117
13	0,0170	—0,0402	0,0612	0,0112	—0,0171	0,0373	0,0105	0,0099
15	0,1464	—0,0632	0,2113	0,0814	0	0,1414	0,0741	0,0689
17	0,3706	—0,0282	0,3183	0,1639	0,0517	0,2215	0,1451	0,1321
19	0,6294	0,0282	0,3183	0,2023	0,0937	0,2275	0,1732	0,1541
21	0,8536	0,0632	0,2113	0,1665	0,0933	0,1568	0,1372	0,1188
23	0,9830	0,0402	0,0612	0,0643	0,0412	0,0494	0,0507	0,0426
25	0,9830	—0,0604	—0,0360	—0,0643	—0,0464	—0,0379	—0,0482	—0,0392
27	0,8536	—0,2357	0	—0,1665	—0,1362	—0,0650	—0,1179	—0,0924
29	0,6294	—0,4598	0,1920	—0,2023	—0,1924	—0,0303	—0,1340	—0,1009
31	0,3706	—0,6905	0,4897	—0,1639	—0,1924	0,0303	—0,1004	—0,0725
33	0,1464	—0,8797	0,7887	—0,0814	—0,1362	0,0650	—0,0455	—0,0313
35	0,0170	—0,9861	0,9748	—0,0112	—0,0464	0,0379	—0,0056	—0,0037

Приложение 12

КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБМОТОК НЕЯВНОПОЛЮСНЫХ ИНДУКТОРОВ

Число делений Z	Число обмотанных пазов z							Число делений Z	Число обмотанных пазов z				
	16	20	24	28	32	36	40		32	36	40	44	48
19	0,7362	—	—	—	—	—	—	50	0,8404	0,8006	0,7573	—	—
20	0,7599	—	—	—	—	—	—	51	0,8463	0,8078	0,7660	—	—
21	0,7807	—	—	—	—	—	—	52	0,8519	0,8147	0,7743	—	—
22	0,7990	—	—	—	—	—	—	53	0,8572	0,8213	0,7821	0,7401	—
23	0,8151	—	—	—	—	—	—	54	0,8622	0,8275	0,7896	0,7489	—
24	0,8294	0,7400	—	—	—	—	—	55	—	0,8333	0,7967	0,7572	—
25	0,8421	0,7588	—	—	—	—	—	56	—	0,8390	0,8034	0,7652	—
26	0,8535	0,7757	—	—	—	—	—	57	—	0,8443	0,8098	0,7727	—
27	—	0,7909	—	—	—	—	—	58	—	0,8493	0,8160	0,7800	0,7416
28	—	0,8047	—	—	—	—	—	59	—	0,8542	0,8218	0,7869	0,7495
29	—	0,8172	0,7427	—	—	—	—	60	—	0,8588	0,8274	0,7934	0,7572
30	—	0,8285	0,7582	—	—	—	—	61	—	—	0,8327	0,7997	0,7645
31	—	0,8388	0,7724	—	—	—	—	62	—	—	0,8378	0,8057	0,7714
32	—	0,8483	0,7855	—	—	—	—	63	—	—	0,8426	0,8114	0,7781
33	—	0,8569	0,7975	0,7303	—	—	—	64	—	—	0,8473	0,8170	0,7845
34	—	—	0,8085	0,7446	—	—	—	65	—	—	0,8517	0,8223	0,7907
35	—	—	0,8186	0,7578	—	—	—	66	—	—	0,8560	0,8273	0,7965
36	—	—	0,8281	0,7701	—	—	—	67	—	—	—	0,8322	0,8022
37	—	—	0,8367	0,7815	—	—	—	68	—	—	—	0,8368	0,8076
38	—	—	0,8448	0,7921	0,7337	—	—	69	—	—	—	0,8413	0,8128
39	—	—	0,8523	0,8020	0,7461	—	—	70	—	—	—	0,8455	0,8178
40	—	—	0,8593	0,8112	0,7576	—	—	71	—	—	—	0,8497	0,8226
41	—	—	—	0,8197	0,7684	—	—	72	—	—	—	0,8536	0,8273
42	—	—	—	0,8278	0,7785	—	—	73	—	—	—	0,8574	0,8317
43	—	—	—	0,8353	0,7880	0,7363	—	74	—	—	—	—	0,8360
44	—	—	—	0,8423	0,7969	0,7472	—	75	—	—	—	—	0,8401
45	—	—	—	0,8489	0,8053	0,7574	—	76	—	—	—	—	0,8441
46	—	—	—	0,8551	0,8132	0,7671	—	77	—	—	—	—	0,8479
47	—	—	—	—	0,8206	0,7762	—	78	—	—	—	—	0,8516
48	—	—	—	—	0,8276	0,7848	0,7384	79	—	—	—	—	0,8552
49	—	—	—	—	0,8342	0,7929	0,7481	80	—	—	—	—	0,8586

Приложение 13

ДРОБНЫЕ ЧИСЛА ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ СИММЕТРИЧНЫХ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНОГО ТОКА С ЗАПОЛНЕНИЕМ ВСЕХ ПАЗОВ

p	Общее число пазов Z																	
	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90	96	102	108	114	120
1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	—	—	—	—	—	—	—	—
2	$1\frac{1}{2}$	2	$2\frac{1}{2}$	3	$3\frac{1}{2}$	4	$4\frac{1}{2}$	5	$5\frac{1}{2}$	6	$6\frac{1}{2}$	7	$7\frac{1}{2}$	8	—	—	—	—
3	1	—	—	2	—	—	3	—	—	4	—	—	5	—	—	6	—	—
4	3/4	1	$1\frac{1}{4}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{3}{4}$	2	$2\frac{1}{4}$	$2\frac{1}{2}$	$2\frac{3}{4}$	3	$3\frac{1}{4}$	$3\frac{1}{2}$	$3\frac{3}{4}$	4	$4\frac{1}{4}$	$4\frac{1}{2}$	$4\frac{3}{4}$	5
5	3/5	4/5	1	$1\frac{1}{5}$	$1\frac{2}{5}$	$1\frac{3}{5}$	$1\frac{4}{5}$	2	$2\frac{1}{5}$	$2\frac{2}{5}$	$2\frac{3}{5}$	$2\frac{4}{5}$	3	$3\frac{1}{5}$	$3\frac{2}{5}$	$3\frac{3}{5}$	$3\frac{4}{5}$	4
6	1/2	—	—	1	—	—	$1\frac{1}{2}$	—	—	2	—	—	$2\frac{1}{2}$	—	—	3	—	—
7	3/7	4/7	5/7	6/7	1	$1\frac{1}{7}$	$1\frac{2}{7}$	$1\frac{3}{7}$	$1\frac{4}{7}$	$1\frac{5}{7}$	$1\frac{6}{7}$	2	$2\frac{1}{7}$	$2\frac{2}{7}$	$2\frac{3}{7}$	$2\frac{4}{7}$	$2\frac{5}{7}$	$2\frac{6}{7}$
8	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8	1	$1\frac{1}{8}$	$1\frac{1}{4}$	$1\frac{3}{8}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{5}{8}$	$1\frac{3}{4}$	$1\frac{7}{8}$	2	$2\frac{1}{8}$	$2\frac{1}{4}$	$2\frac{3}{8}$	$2\frac{1}{2}$
9	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	2	—	—
10	3/10	2/5	1/2	3/5	7/10	4/5	9/10	1	$1\frac{1}{10}$	$1\frac{1}{5}$	$1\frac{3}{10}$	$1\frac{2}{5}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{3}{5}$	$1\frac{7}{10}$	$1\frac{4}{5}$	$1\frac{9}{10}$	2
11	3/11	4/11	5/11	6/11	7/11	8/11	9/11	10/11	1	$1\frac{1}{11}$	$1\frac{2}{11}$	$1\frac{3}{11}$	$1\frac{4}{11}$	$1\frac{5}{11}$	$1\frac{6}{11}$	$1\frac{7}{11}$	$1\frac{8}{11}$	$1\frac{9}{11}$
12	1/4	—	—	1/2	—	—	3/4	—	—	1	—	—	$1\frac{1}{4}$	—	—	$1\frac{1}{2}$	—	—
13	3/13	4/13	5/13	6/13	7/13	8/13	9/13	10/13	11/13	12/13	1	$1\frac{1}{13}$	$1\frac{2}{13}$	$1\frac{3}{13}$	$1\frac{4}{13}$	$1\frac{5}{13}$	$1\frac{6}{13}$	$1\frac{7}{13}$
14	3/14	2/7	5/14	3/7	1/2	4/7	9/14	5/7	11/14	6/7	13/14	1	$1\frac{1}{14}$	$1\frac{1}{7}$	$1\frac{3}{14}$	$1\frac{2}{7}$	$1\frac{5}{14}$	$1\frac{3}{7}$
15	1/5	—	—	2/5	—	—	3/5	—	—	4/5	—	—	1	—	—	$1\frac{1}{5}$	—	—
16	3/16	1/4	5/16	3/8	7/16	1/2	9/16	5/8	11/16	3/4	13/16	7/8	15/16	1	$1\frac{1}{16}$	$1\frac{1}{8}$	$1\frac{3}{16}$	$1\frac{1}{4}$
17	3/17	4/17	5/17	6/17	7/17	8/17	9/17	10/17	11/17	12/17	13/17	14/17	15/17	16/17	1	$1\frac{1}{17}$	$1\frac{2}{17}$	$1\frac{3}{17}$
18	—	—	—	—	—	1/2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—
19	3/19	4/19	5/19	6/19	7/19	8/19	9/19	10/19	11/19	12/19	13/19	14/19	15/19	16/19	17/19	18/19	1	$1\frac{1}{19}$
20	3/20	1/5	1/4	3/10	7/20	2/5	9/20	1/2	11/20	3/5	13/20	7/10	3/4	4/5	17/20	9/10	19/20	1

Приложение 14

ДРОБНЫЕ ЧИСЛА ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ СИММЕТРИЧНЫХ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНОГО ТОКА С ТРЕМЯ НЕЗАПОЛНЕННЫМИ ПАЗАМИ

p	Общее число пазов Z																	
	21	27	33	39	45	51	57	63	69	75	81	87	93	99	105	111	117	123
1	$3\frac{1}{2}$	$4\frac{1}{2}$	$5\frac{1}{2}$	$6\frac{1}{2}$	$7\frac{1}{2}$	$8\frac{1}{2}$	$9\frac{1}{2}$	$10\frac{1}{2}$	$11\frac{1}{2}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	$1\frac{3}{4}$	$2\frac{1}{4}$	$2\frac{3}{4}$	$3\frac{1}{4}$	$3\frac{3}{4}$	$4\frac{1}{4}$	$4\frac{3}{4}$	$5\frac{1}{4}$	$5\frac{3}{4}$	$6\frac{1}{4}$	$6\frac{3}{4}$	$7\frac{1}{4}$	—	—	—	—	—	—
4	7/8	$1\frac{1}{8}$	$1\frac{3}{8}$	$1\frac{5}{8}$	$1\frac{7}{8}$	$2\frac{1}{8}$	$2\frac{3}{8}$	$2\frac{5}{8}$	$2\frac{7}{8}$	$3\frac{1}{8}$	$3\frac{3}{8}$	$3\frac{5}{8}$	$3\frac{7}{8}$	$4\frac{1}{8}$	$4\frac{3}{8}$	$4\frac{5}{8}$	$4\frac{7}{8}$	$5\frac{1}{8}$
5	7/10	9/10	$1\frac{1}{10}$	$1\frac{3}{10}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{7}{10}$	$1\frac{9}{10}$	$2\frac{1}{10}$	$2\frac{3}{10}$	$2\frac{1}{2}$	$2\frac{7}{10}$	$2\frac{9}{10}$	$3\frac{1}{10}$	$3\frac{3}{10}$	$3\frac{1}{2}$	$3\frac{7}{10}$	$3\frac{9}{10}$	$4\frac{1}{10}$
7	1/2	9/14	11/14	13/14	$1\frac{1}{14}$	$1\frac{3}{14}$	$1\frac{5}{14}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{9}{14}$	$1\frac{11}{14}$	$1\frac{13}{14}$	$2\frac{1}{14}$	$2\frac{3}{14}$	$2\frac{5}{14}$	$2\frac{1}{2}$	$2\frac{9}{14}$	$2\frac{11}{14}$	$2\frac{13}{14}$
8	7/16	9/16	11/16	13/16	15/16	$1\frac{1}{16}$	$1\frac{3}{16}$	$1\frac{5}{16}$	$1\frac{7}{16}$	$1\frac{9}{16}$	$1\frac{11}{16}$	$1\frac{13}{16}$	$1\frac{15}{16}$	$2\frac{1}{16}$	$2\frac{3}{16}$	$2\frac{5}{16}$	$2\frac{7}{16}$	$2\frac{9}{16}$
10	7/20	9/20	11/20	13/20	3/4	17/20	19/20	$1\frac{1}{20}$	$1\frac{3}{20}$	$1\frac{1}{4}$	$1\frac{7}{20}$	$1\frac{9}{20}$	$1\frac{11}{20}$	$1\frac{13}{20}$	$1\frac{3}{4}$	$1\frac{17}{20}$	$1\frac{19}{20}$	$2\frac{1}{20}$
11	7/22	9/22	1/2	13/22	15/22	17/22	19/22	21/22	$1\frac{1}{22}$	$1\frac{3}{22}$	$1\frac{5}{22}$	$1\frac{7}{22}$	$1\frac{9}{22}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{13}{22}$	$1\frac{15}{22}$	$1\frac{17}{22}$	$1\frac{19}{22}$
13	7/26	9/26	11/26	1/2	15/26	17/26	19/26	21/26	23/26	25/26	$1\frac{1}{26}$	$1\frac{3}{26}$	$1\frac{5}{26}$	$1\frac{7}{26}$	$1\frac{9}{26}$	$1\frac{11}{26}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{15}{26}$
14	1/4	9/28	11/28	13/28	15/28	17/28	19/28	3/4	23/28	25/28	27/28	$1\frac{1}{28}$	$1\frac{3}{28}$	$1\frac{5}{28}$	$1\frac{1}{4}$	$1\frac{9}{28}$	$1\frac{11}{28}$	$1\frac{13}{28}$
16	7/32	9/32	11/32	13/32	15/32	17/32	19/32	21/32	23/32	25/32	27/32	29/32	31/32	$1\frac{1}{32}$	$1\frac{3}{32}$	$1\frac{5}{32}$	$1\frac{7}{32}$	$1\frac{9}{32}$
17	7/34	9/34	11/34	13/34	15/34	1/2	19/34	21/34	23/34	25/34	27/34	29/34	31/34	33/34	$1\frac{1}{34}$	$1\frac{3}{34}$	$1\frac{5}{34}$	$1\frac{7}{34}$
19	7/38	9/38	11/38	13/38	15/38	17/38	1/2	21/38	23/38	25/38	27/38	29/38	31/38	33/38	35/38	37/38	$1\frac{1}{38}$	$1\frac{3}{38}$
20	7/40	9/40	11/40	13/40	3/8	17/40	19/40	21/40	23/40	25/8	27/40	29/40	31/40	33/40	7/8	37/40	39/40	$1\frac{1}{40}$

Примечание. При двухслойных обмотках все пазы заполняются сторонами секций и незаполненных пазов нет.

Приложение 15

ВАРИАНТЫ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНОГО ТОКА С ДРОБНЫМИ ЧИСЛАМИ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ q ПРИ ЗНАМЕНАТЕЛЯХ d ДО 10 ВКЛЮЧИТЕЛЬНО

q	Z	β	k_{q1}	$k_{q1/d}$	Распределение секций		Пучки векторов ЭДС для основной волны
$1^1/_2$ $1^1/_4$	9 15	1,0	0,9598 0,9567	0 —0,1496	1 2 1 1 1 2 1 (1)		1 1 1 1 1 1 1 1
$1^2/_4$	18	1,0 0,8889	0,9598 0,9452	0 0,1667	2 1 2 1 (2) 1 2 2 1		2 2 2 1 2 2 1
$1^3/_4$ $1^1/_5$	21 36	1,0	0,9558 0,9561	—0,0947 0,1453	1 2 2 2 (1) 1 1 2 1 1		1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
$1^2/_5$	42		0,9558 0,9345	0,0748 —0,1983	2 1 1 1 2 1 2 1 2 1	 *	1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1
$1^3/_5$	48	1,0 0,8750	0,9556 0,9393	—0,0660 0,1707	1 2 2 2 1 2 1 2 1 2		1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 1
$1^4/_5$ $1^1/_7$	54 48	1,0	0,9555 0,9556	—0,0930 0,1413	2 2 1 2 2 1 1 1 2 1 1 1		1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
$1^2/_7$	54		0,9555 0,9426 0,9161	—0,0571 0,1591 —0,2273	2 1 1 1 1 1 2 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 2 1 1	 * * *	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 0 1 0 1 1 1 1 1 0 1 0 1
$1^3/_7$	60	1,0 0,9000 0,9000	0,9554 0,9449 0,9036	0,0643 —0,0911 0,2575	2 1 1 2 1 1 2 1 1 2 2 2 1 1 1 2 1 2 1 2 1	 *	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 $\underline{1}\ 0\ 0\ \bar{1}\ \underline{1}\ 0\ \underline{1}\ \bar{1}\ \underline{1}\ \bar{1}\ 0\ \bar{1}\ \underline{1}\ 0\ 0\ \bar{1}$

Продолжение приложения 15

q	Z	β	k_{q1}	$k_{q1/d}$	Распределение секций		Пучки векторов ЭДС для основной волны
$1^4/_7$	66	1,0 1,0 —	0,9553 0,9466 0,9125	—0,0578 0,0851 —0,2364	2 1 1 2 2 1 1 (2) 1 1 2 2 2 2 1 (1) 1 2 1 2 2 1 2 (1)	 *	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 0 0 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 0 0 1
$1^5/_7$	72	1,0 0,9167 0,8611	0,9552 0,9430 0,9335	0,0427 —0,1200 0,1720	1 2 2 2 2 2 1 2 1 2 2 2 1 2 2 2 1 2 1 2 2		1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 $\underline{1}\ 0\ \underline{1}\ \bar{1}\ \underline{1}\ \bar{1}\ \underline{1}\ \bar{1}\ \underline{1}\ \bar{1}\ \underline{1}\ \bar{1}\ 0\ \bar{1}$ $\underline{1}\ 0\ \underline{1}\ 0\ \underline{1}\ \bar{1}\ \underline{1}\ \bar{1}\ \underline{1}\ \bar{1}\ \underline{1}\ \bar{1}\ 0\ \bar{1}\ 0\ \bar{1}$
$1^6/_7$ $1^1/_8$	78 27	1,0	0,9552 0,9555	—0,0897 —0,1403	2 2 2 1 2 2 2 1 1 1 1 2 1 1 1 (1)		1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
$1^2/_8$	30	1,0 0,9333 0,8667 0,8000	0,9567 0,9514 0,9358 0,9099	0 —0,1000 0,1827 0,2338	1 1 2 1 1 1 2 1 (1) 1 1 1 2 2 1 1 1 1 1 1 2 1 2 1 1 1 1 1 2 1 1 2 1 1		2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 1 1 1 2 2 2 1 1 1 1 1 2 2 1 1 1
$1^3/_8$	33	1,0 1,0 —	0,9553 0,9466 0,8872	0,0490 —0,1198 —0,2814	1 1 1 2 2 2 1 1 (1) 1 1 2 1 2 1 2 1 (1) 1 2 1 1 2 1 1 2 (1)	 *	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 0 0 1
$1^4/_8$	36	1,0 0,8889 0,8889 — —	0,9598 0,9452 0,9452 0,9309 0,9309 0,8882	0 0 —0,1179 —0,1511 —0,1566 0,2839	1 2 1 2 1 2 1 2 (1) 2 1 1 2 2 1 1 2 1 1 2 2 2 2 1 1 2 1 1 2 2 2 1 1 (2) 1 1 2 2 1 2 2 1 (1) 1 2 1 2 2 1 2 1	 * * * * * * * * * * * * *	4 4 4 2 4 4 2 2 4 4 2 1 3 4 3 1 1 3 4 3 1 1 2 3 3 2 1

q	Z	β	k_{q1}	$k_{q^1/d}$	Распределение секций		Пучки векторов ЭДС для основной волны
$1^5/_8$	39	1,0 1,0 —	0,9552 0,9490 0,9062	0,0418 —0,0997 —0,2457	1 1 2 2 2 2 2 1 (1) 1 2 1 2 2 2 1 2 (1) 1 2 2 1 2 1 2 2 (1)	*	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 0 1 0 0 1
$1^6/_8$	42	1,0 0,9524 0,9048 0,8571	0,9558 0,9531 0,9451 0,9319	0 —0,0357 0,1300 0,1762	2 2 1 2 2 2 1 2 (2) 1 2 2 2 2 2 2 1 2 1 2 2 2 2 2 1 (2) 2 1 2 2 2 2 1 2		2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 2 2 1 1 1 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 2 2 2 2 1 1 1
$1^7/_8$ $1^1/_{10}$	45 33	1,0	0,9551 0,9553	—0,0890 0,0784	1 2 2 2 2 2 2 2 (1) 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1		1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
$1^2/_{10}$	36	1,0 0,9444 0,8889 0,8333 0,7778	0,9561 0,9525 0,9416 0,9236 0,8985	0,1453 —0,2857 0,0497 0,0376 —0,1113	1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 2 1 2 1 1 1 (1) 1 1 1 1 2 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 (1) 1 1 1 2 1 1 2 1 1 1		2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 2 1 1 1 2 2 2 2 1 1 1 1 1 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 2 2 1 1 1 1
$1^3/_{10}$	39	1,0 1,0 — —	0,9952 0,9490 0,9244 0,8585	—0,0406 0,1054 —0,0467 0,0948	1 1 1 1 2 2 2 1 1 1 (1) 1 1 1 2 1 2 1 2 1 1 (1) 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 (1) 1 1 2 1 1 2 1 1 2 1 (1)	*	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 0 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 1 0 1 1 0 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 0-0 1
$1^4/_{10}$	42	1,0 0,9524	0,9558 0,9531	0,0748 0,0220	2 1 1 1 2 2 1 1 1 2 2 1 1 1 2 2 2 1 1 1 (2)		2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 2 2 1

q	Z	β	k_{q1}	$k_{q^1/d}$	Распределение секций		Пучки векторов ЭДС для основной волны
$1^4/_{10}$	42	0,9048 0,9048 1,0 0,9048 — 0,8571 0,8095 0,7143	0,9451 0,9451 0,9345 0,9240 0,9134 0,9111 0,8930 0,8419	0,0430 —0,0618 —0,1983 0,1638 0,0273 0,1558 —0,0724 —0,0441	1 1 2 1 2 1 2 1 2 1 (1) 1 1 1 2 2 2 2 1 1 1 1 2 1 2 1 1 2 1 2 1 1 1 2 1 2 2 1 2 1 1 1 1 2 2 1 1 2 2 1 1 2 1 1 2 1 2 1 2 1 1 (2) 1 1 1 2 2 1 2 2 1 1 (1) 1 2 1 1 2 2 1 1 2 1	 * * * * * * * * * * * * *	1 1 2 2 2 2 2 1 1 1 1 2 2 2 2 2 1 1 2 0 2 2 2 2 2 0 2 $1\ 0\ \bar{2}\ 1\ \bar{2}\ \bar{2}\ \bar{2}\ \bar{1}\ \bar{2}\ 0\ \bar{1}$ $1\ \bar{1}\ 1\ \bar{0}\ \bar{1}\ \bar{2}\ \bar{2}\ \bar{2}\ 1\ \bar{0}\ 1\ 1\ 1$ $\underline{1}\ 0\ \underline{1}\ \underline{\bar{2}}\ \underline{1}\ \underline{\bar{2}}\ \underline{\bar{2}}\ \bar{1}\ \underline{\bar{2}}\ \bar{1}\ 0\ \bar{1}$ $\underline{1}\ 0\ \underline{1}\ \underline{1}\ \underline{\bar{2}}\ \underline{1}\ \underline{\bar{2}}\ \bar{1}\ \bar{2}\ \bar{1}\ \bar{1}\ 0\ 1$ $\underline{1}\ \bar{0}\ \underline{1}\ \underline{\bar{1}}\ \underline{1}\ \underline{1}\ \underline{\bar{2}}\ 0\ \underline{\bar{2}}\ \bar{1}\ \bar{1}\ \bar{1}\ \bar{1}\ 0\ \bar{1}$
$1^5/_{10}$	45	1,0 — — — — —	0,9598 0,9366 0,9366 0,9366 0,9135 0,8468	0 —0,0047 —0,1282 0,1253 —0,0029 —0,0835	1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 (1) 1 1 1 2 2 2 2 2 1 1 (1) 1 2 1 1 2 2 2 1 1 2 (1) 1 1 2 2 1 2 1 2 2 1 (1) 1 1 2 1 2 2 2 1 2 1 (1) 1 2 2 1 1 2 1 1 2 2 (1)	 * * * * *	5 5 5 1 4 5 4 1 1 4 5 4 1 1 4 5 4 1 2 3 5 3 2 1 2 3 3 3 2 1
$1^6/_{10}$	48	1,0 0,9167 0,9167 — 0,8750 — 0,8333	0,9556 0,9474 0,9474 0,9411 0,9393 0,9312 0,9231	—0,0660 0,0524 0,0524 —0,0212 0,1707 —0,1355 —0,0171	2 2 1 1 2 2 2 1 1 2 (2) 1 1 2 2 2 2 2 2 1 1 2 1 2 1 2 2 2 1 2 1 (2) 1 1 2 2 2 1 2 2 2 1 (1) 2 1 2 1 2 2 1 2 1 2 1 2 1 2 2 2 2 1 2 1 2 1 1 2 2 2 2 1 1 2	 ⊙	2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 1 1 2 2 1 2 2 2 1 2 2 2 0 2 2 2 2 2 2 0 2 1 0 2 1 2 2 2 2 1 2 0 1 1 1 1 1 2 2 2 2 1 1 1 1

q	Z	β	k_{q1}	k_{q1}/d	Распределение секций		Пучки векторов ЭДС для основной волны
$1^6/_{10}$	48	0,8750	0,9212	—0,1420	1 2 1 2 2 1 2 2 1 2 (1)		1 0 1 $\bar{2}$ 1 $\bar{2}$ $\bar{2}$ $\bar{2}$ $\bar{1}$ $\bar{2}$ $\bar{1}$ 0 $\bar{1}$
		—	0,9073	0,0486	2 1 1 2 2 2 2 2 1 1 (2)	⊙	$\bar{1}$ 0 $\bar{1}$ $\bar{1}$ $\bar{2}$ $\bar{1}$ $\bar{2}$ $\bar{2}$ 1 $\bar{2}$ 1 1 0 1
		—	0,8678	0,0653	1 2 2 1 2 2 1 2 2 1	⊙	1 0 1 1 1 1 2 1 1 2 1 1 1 1 0 1
$1^7/_{10}$	51	1,0	0,9551	0,0309	1 1 2 2 2 2 2 2 2 1 (1)		1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
		1,0	0,9515	—0,0813	1 2 1 2 2 2 2 2 1 2 (1)	*	1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1
		—	0,9370	0,0272	1 2 2 2 1 2 1 2 2 2 (1)		1 0 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 0 0 1
		—	0,8979	—0,0869	1 2 2 1 2 2 2 1 2 2 (1)		1 0 0 1 0 0 1 1 0 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 0 0 1
$1^8/_{10}$	54	1,0	0,9555	—0,0930	2 2 1 2 2 2 2 1 2 2		2 2 2 2 2 2 2 2 2
		0,9630	0,9539	0,0746	2 1 2 2 2 2 2 2 2 1 (2)		1 2 2 2 2 2 2 2 2 1
		0,9259	0,9490	—0,0267	1 2 2 2 2 2 2 2 2 1		1 1 2 2 2 2 2 2 2 1 1
		0,8889	0,9410	—0,0314	2 2 1 2 2 2 2 2 1 2 (2)		1 1 1 2 2 2 2 2 2 1 1 1
		0,8519	0,9297	0,0777	2 1 2 2 2 2 2 2 1 2		1 1 1 1 2 2 2 2 2 1 1 1 1
$1^9/_{10}$	57	1,0	0,9551	—0,0444	1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 (1)		1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

П р и м е ч а н и е. Эквивалентные обмотки для некоторых вариантов распределения секций обозначены:

* — однослойная обмотка с одним отставленным пазом с каждой стороны (по приложению 7);
* * — однослойная обмотка с двумя отставленными пазами с каждой стороны (по приложению 8);
* * * — две однослойные обмотки с одним отставленным пазом, сдвинутые на три зубцовых деления;
* * * * — две двухслойные обмотки с укорочением на одно деление, сдвинутые также на одно деление;
* * * * * — три однослойные обмотки со сдвигом по одному зубцовому делению;
⊙ — две двухслойные обмотки с различными укорочениями, сдвинутые на три зубцовых деления.

Приложение 16

КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНОГО ТОКА С ДРОБНЫМИ ЧИСЛАМИ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ ПРИ ЗНАМЕНАТЕЛЕ, РАВНОМ 2

Порядок ν	Число пазов на полюс и фазу q							
	$1^1/_2$	$2^1/_2$	$3^1/_2$	$4^1/_2$	$5^1/_2$	$6^1/_2$	$7^1/_2$	∞
1	0,9598	0,9567	0,9558	0,9555	0,9554	0,9552	0,9551	0,9549
2	0,1774	0,1022	0,0722	0,0559	0,0457	0,0386	0,0334	0
3	0,6667	0,6472	0,6420	0,6399	0,6388	0,6382	0,6378	0,6366
4	0,2176	0,1095	0,0747	0,0571	0,0463	0,0390	0,0337	0
5	0,2176	0,2000	0,1955	0,1937	0,1928	0,1923	0,1920	0,1910
6	0,6667	0,2472	0,1585	0,1182	0,0947	0,0792	0,0686	0
7	0,1774	0,1494	0,1429	0,1403	0,1390	0,1382	0,1378	0,1364
8	0,9598	0,1494	0,0865	0,0622	0,0490	0,0405	0,0347	0
9	0,3333	0,2472	0,2291	0,2222	0,2188	0,2169	0,2157	0,2122
10	0,9598	0,2000	0,0974	0,0665	0,0511	0,0418	0,0355	0
11	0,1774	0,1095	0,0974	0,0930	0,0909	0,0897	0,0890	0,0868
12	0,6667	0,6472	0,2291	0,1450	0,1081	0,0869	0,0730	0
13	0,2176	0,1022	0,0865	0,0810	0,0784	0,0769	0,0760	0,0735
14	0,2176	0,9567	0,1429	0,0810	0,0578	0,0455	0,0378	0
15	0,6667	0,2000	0,1585	0,1450	0,1388	0,1354	0,1333	0,1273
16	0,1774	0,9567	0,1955	0,0930	0,0628	0,0481	0,0393	0
17	0,9598	0,1022	0,0747	0,0665	0,0628	0,0608	0,0596	0,0562
18	0,3333	0,6472	0,6420	0,2222	0,1388	0,1028	0,0824	0
19	0,9598	0,1095	0,0722	0,0622	0,0578	0,0555	0,0541	0,0503
20	0,1774	0,2000	0,9558	0,1403	0,0784	0,0555	0,0435	0
21	0,6667	0,2472	0,1429	0,1182	0,1081	0,1028	0,0996	0,0909
22	0,2176	0,1494	0,9558	0,1937	0,0909	0,0608	0,0463	0
23	0,2176	0,1494	0,0722	0,0571	0,0511	0,0481	0,0463	0,0415

Приложение 17

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ВАРИАНТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЕКЦИЙ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНОГО ТОКА С ДРОБНЫМИ ЧИСЛАМИ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ

Число пазов на полюс и фазу q	Распределение секций
$1^2/_5$	2 1 1 1 2
$1^2/_7$	1 1 2 1 2 1 1
$1^3/_7$	1 2 1 2 1 2 1
$1^3/_8$	1 1 2 1 2 1 2 1 (I)
$1^3/_{10}$	1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 (I)
$1^2/_{11}$	1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1
$1^4/_{11}$	2 1 1 1 2 1 2 1 1 1 2
$1^5/_{11}$	1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1
$1^2/_{13}$	1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1
$1^3/_{13}$	1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1

Число пазов на полюс и фазу q	Распределение секций
$1^{4}/_{13}$	1 1 2 1 2 1 1 1 2 1 2 1 1
$1^{5}/_{13}$	2 1 1 1 2 1 2 1 2 1 1 1 2
$1^{6}/_{13}$	1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1
$1^{3}/_{14}$	1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 (1)
$1^{5}/_{14}$	1 1 2 1 1 2 1 2 1 2 1 1 2 1 (1)
$1^{3}/_{16}$	1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 (1)
$1^{5}/_{16}$	1 2 1 1 1 1 2 1 2 1 2 1 1 1 1 2 (1)
$1^{7}/_{16}$	1 2 1 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 1 2 (1)
$1^{2}/_{17}$	1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1
$1^{3}/_{17}$	1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1
$1^{4}/_{17}$	1 1 2 1 1 1 1 2 1 2 1 1 1 1 2 1 1
$1^{5}/_{17}$	2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2
$1^{6}/_{17}$	2 1 1 1 2 1 2 1 1 1 2 1 2 1 1 1 2
$1^{7}/_{17}$	2 1 1 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 1 1 2
$1^{8}/_{17}$	1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1
$1^{2}/_{19}$	1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1
$1^{3}/_{19}$	1 1 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1
$1^{4}/_{19}$	1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1
$1^{5}/_{19}$	1 1 2 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 2 1 1
$1^{6}/_{19}$	2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2
$1^{7}/_{19}$	1 2 1 2 1 1 1 2 1 2 1 2 1 1 1 2 1 2 1
$1^{8}/_{19}$	1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1
$1^{9}/_{19}$	1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1
$1^{3}/_{20}$	1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 (1)
$1^{7}/_{20}$	1 2 1 1 2 1 1 1 2 1 2 1 2 1 1 1 2 1 1 2 (1)
$1^{9}/_{20}$	1 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 (1)
$1^{3}/_{22}$	1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 (1)
$1^{5}/_{22}$	1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 (1)
$1^{7}/_{22}$	1 1 2 1 1 1 2 2 1 1 1 2 1 1 1 2 2 1 1 1 2 1 (1)
$1^{9}/_{22}$	1 2 1 1 2 1 2 1 1 2 1 2 1 2 1 1 2 1 2 1 1 2 (1)
$1^{2}/_{23}$	1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1
$1^{3}/_{23}$	1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1
$1^{4}/_{23}$	1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1
$1^{5}/_{23}$	1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1
$1^{6}/_{23}$	1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1
$1^{7}/_{23}$	1 1 2 1 2 1 1 1 1 2 1 2 1 2 1 1 1 1 2 1 2 1 1
$1^{8}/_{23}$	2 1 1 1 2 1 1 1 2 2 1 1 1 2 2 1 1 1 2 1 1 1 2
$1^{9}/_{23}$	2 1 1 1 2 2 1 1 1 2 1 2 1 2 1 1 1 2 2 1 1 1 2
$1^{10}/_{23}$	1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 1 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1
$1^{11}/_{23}$	1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1
$1^{2}/_{25}$	1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1
$1^{3}/_{25}$	1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1
$1^{4}/_{25}$	1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1
$1^{6}/_{25}$	1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1
$1^{7}/_{25}$	1 1 2 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 2 1 1
$1^{8}/_{25}$	2 1 1 1 1 2 1 2 1 1 1 2 1 2 1 1 1 2 1 2 1 1 1 1 2
$1^{9}/_{25}$	2 1 1 1 2 1 2 1 1 1 2 1 2 1 2 1 1 1 2 1 2 1 1 1 2
$1^{11}/_{25}$	1 2 1 2 1 2 1 2 1 1 2 1 2 1 2 1 1 2 1 2 1 2 1 2 1
$1^{12}/_{25}$	1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1
$1^{3}/_{26}$	1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 (1)
$1^{7}/_{26}$	1 1 2 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 2 1 (1)
$1^{11}/_{26}$	1 2 1 1 2 1 2 1 2 1 1 2 1 2 1 2 1 1 2 1 2 1 2 1 1 2 (1)
$1^{5}/_{28}$	1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 (1)
$1^{11}/_{28}$	1 1 2 1 2 1 2 1 2 1 1 1 2 1 2 1 2 1 1 1 2 1 2 1 2 1 2 1 (1)

Приложение 18

ЧИСЛИТЕЛИ И ЗНАМЕНАТЕЛИ ДРОБНЫХ ЧИСЕЛ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ, ПРИ КОТОРЫХ НЕТ МЕСТНОГО ЗНАЧЕНИЯ ВТОРОГО ЧАСТИЧНОГО ШАГА

Числитель c	Знаменатель d																	
	2	4	5	7	8	10	11	13	14	16	17	19	20	22	23	25	26	28
1	В+	В—																
		Д+	А+	А—	Д—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	—	—	—	—	—	Д+	А+	А—	Д—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	Е—																
		Г+	—	—	В+	В—	—	—	—	Д+	А+	А—	Д—	—	—	—	—	—
4	—	—	Б—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Д+	А+	А—	Д—	—
5	—	—	—	Г—	Г—	—	—	—	В+	В—	—	—	—	—	—	—	—	Д+
6	—	—	—	Б+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	Е+	Г+	—	—	—	—	—	—	В+	В—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	Е—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	Б—	—	Г+	—	—	—	—	—	—	—	В+	В—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	—	—	—	—	—	—	—	Б+	—	Г+	—	—	—	—	—	—	—	—
12	—	—	—	—	—	—	—	—	Е+	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Е—	—	—	Г—	—	—	—	—	—
14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Б—	—	—	—	—	—	—	—
15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Г+	—	—	—	—
16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Б+	—	—	—	—	—	—
17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Е+	—	—	—	Г—	—
18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Е—	—	—	—	—
19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Б—	—	—	Г+
20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Б+	—	—
22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Е+	—
23	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Е—

Примечание. Знаки плюс и минус при буквенных обозначениях указывают, какой знак должен быть принят в соответствующей формуле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Общая литература по обмоткам машин всех видов

1. **Рихтер Р.** Обмотки якорей машин постоянного и переменного тока. М.: ОНТИ, 1933.
2. **Кучера Я., Гапл Й.** Обмотки вращательных электрических машин. Прага: Изд-во Академии наук ЧССР, 1963.
3. **Электрические машины:** Расчет вращающихся электрических машин/ К. Фогт и др. Берлин: Техника, без указания года выпуска.
4. **Обмотки** электрических машин/В. И. Зимин и др. Л.: Энергия, 1975.
5. **Справочная книга** для электротехников (СЭТ)/Под ред. В. А. Толвинского. Л.: Кубуч, 1934. Т. 5.

Общая литература по обмоткам машин переменного тока

6. **Арнольд Э.** Техника переменного тока. Берлин: Изд-во Ю. Шпрингер, 1912. Т. 3: Обмотки машин переменного тока.
7. **Лившиц-Гарик М.** Обмотки машин переменного тока. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959.
8. **Домбровский В. В., Хуторецкий Г. М.** Основы проектирования электрических машин переменного тока. Л.: Энергия, 1974.

К главе первой

9. **Московский М. И.** Технология электромашиностроения. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1947. Гл. 12—15.
10. **Сухоруков Ф. Т.** Технология обмоточно-изоляционного производства. М.; Л.: Госэнергоиздат. 1951.
11. **Бернштейн Л. М.** Изоляция электрических машин общепромышленного применения. М.: Энергия, 1971.
12. **Виноградов Н. В.** Производство электрических машин. М.: Энергия, 1970. Гл. 9.
13. **Видеман Е., Келленбергер В.** Конструкция электрических машин: Пер. с нем. Л.: Энергия, 1972. Гл. 7.

Технология крупного электромашиностроения. Л.: Энергия, 1981:

14. Т. 1: **Фомин Б. П., Цихановнч Е. Г., Виро Г. М.** Турбогенераторы. Гл. 4, 5 и 7.
15. Т. 2: **Зунделевич М. И., Прутковский С. А.** Гидрогенераторы. Гл. 1 и 5.
16. Т. 3: **Блюменкранц Д. М.** Крупные машины. Гл. 1, 2 и 8.

К главе второй

17. **Асинхронные двигатели** общего назначения/Е. П. Бойко и др. М.: Энергия, 1980. § 4-5.

Вопросы, составляющие содержание данной главы, наиболее полно рассматриваются в работе [6], а также в [1 и 2] и в более популярной форме — в [4].

К главе третьей

18. **Сорокер Т. Г., Мордвинов Ю. В.** Составление схем и расчет обмоточных коэффициентов симметричных петлевых обмоток многофазного переменного тока//Вестник электропромышленности. 1955. № 2.
19. **Хуторецкий Г. М.** Транспозиция для компенсации циркуляционных токов лобовой части обмотки статора//Труды ИЭМ. Л.: Наука, 1968.

См. также работу [8, § 4-6].

К главе четвертой

20. **Хойбах Ю.** Асинхронный трехфазный двигатель. Берлин: Изд-во Ю. Шпрингер, 1923. § 50.
21. **Пинский Г. Б.** Учет неравномерного размещения полюсов ротора//Сб. Электросила. Л.: Энергия, 1979, № 32.

К главе пятой

22. **Заславский Д. И.** Двухслойные трехфазные обмотки с дробными числами пазов на полюс и фазу//Вестник электропромышленности. 1935. № 12 и 1936. № 1.
23. **Вольдек А. И.** Намагничивающие силы трехфазных дробных обмоток// Труды ЛПИ. Электромашиностроение. Л.; М.: Госэнергоиздат, 1960, № 209.
24. **Дулькин А. И.** Намагничивающая сила обмотки якоря высоковольтного гидрогенератора//Труды МЭИ. М.: МЭИ, 1971, № 78.
25. **Ипатов П. М.** Гармонические МДС обмотки статора с дробным числом пазов на полюс и фазу//Сб. Электросила. Л.; М.: Госэнергоиздат, 1961, № 20.
26. **Касьянов В. Т.** Составление схем петлевых и волновых обмоток трехфазного тока//Сб. Электросила. Л.; М.: Госэнергоиздат, 1949, № 6.
27. **Жерве Г. К.** Обмотки шестифазного тока с дробными числами пазов на полюс и фазу//Сб. Электросила. Л.: Энергоиздат, 1981, № 33.

См. также работу [7, гл. 4 и 5].

К главе шестой

28. **Гидрогенераторы**/И. А. Глебов и др. Л.: Энергоиздат, 1982.
29. **Проектирование** гидрогенераторов/В. В. Домбровский и др. М.; Л.: Энергия, 1965. Ч. 1, гл. 3. 1968. Ч. 2, гл. 4.
30. **Ипатов П. М.** Практический способ составления схем волновых обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу//Вестник электропромышленности. 1952. № 9.
31. **Касьянов В. Т.** Составление некоторых специальных схем трехфазных волновых обмоток//Сб. Электросила. Л.; М.: Госэнергоиздат, 1951, № 8.
32. **Домбровский В. В., Дукштау А. А., Черныш Б. Н.** О проектировании волновых обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу//Сб. Электросила. Л.: Энергия, 1967, № 26.

См. также работу [26].

К главе седьмой

33. **Харитонов А. М.** Многоскоростные электродвигатели. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1954.
34. **Сальмон А.** Двойное изменение фазы в асинхронных двигателях//Ревю женераль де л'электрисите, Париж, 1973, т. 82, № 5.
35. **Дукштау А. А., Ипатов П. М.** Синхронная машина с переключением полюсов//Сб. Электросила, М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. № 22.
36. **Турбогенераторы**/В. В. Титов и др. Л.: Энергия, 1967. § 8-4 и 8-5.
37. **Титов В. В.** Статорные обмотки с увеличенным числом параллельных ветвей//Сб. Электросила. Л.: Энергия, 1979, № 32.
38. **Жерве Г. К.** Обмотки статоров турбогенераторов с тремя параллельными ветвями//Сб. Электросила. Л.: Энергия, 1979, № 32.

К главе восьмой

39. **Рабинович И. Н., Шубов И. Г.** Проектирование электрических машин постоянного тока. Л.: Энергия, 1967. Гл. 7.

40. **Марков В. А.** Двухходовые петлевые обмотки машин постоянного тока// Электричество. 1940. № 7.

41. **Левитус А. И.** Лягушечья обмотка и ее различные выполнения//Вестник электропромышленности, 1940. № 9.

42. **Касьянов В. Т.** О свойствах, применении и проектировании простейших и сложных лягушечьих обмоток//Сб. Электросила. Л.; М.: Госэнергоиздат, 1947, № 4.

43. **Гурин Я. С., Курочкин М. Н.** Проектирование электрических машин постоянного тока. М.: Госэнергоиздат, 1961.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Производственное издание

Жерве Георгий Константинович

ОБМОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

ОСНОВЫ УСТРОЙСТВА, ТЕОРИИ И РАБОТЫ

Редактор *Л. М. Пархоменко*
Художник переплета *В. В. Беляков*
Художественный редактор *Т. Ю. Теплицкая*
Технический редактор *Н. А. Минеева*
Корректор *Н. Б. Чухутина*

ИБ № 2831

Сдано в набор 22.11.88. Подписано в печать 19.04.89. М-32746. Формат $60\times90^1/_{16}$.
Бумага офсетная № 2. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Усл. печ л. 25.
Усл. кр.-отт. 25. Уч.-изд. л. 29,33. Тираж 30 000 экз. Заказ № 625. Цена 1 р. 90 к.

Энергоатомиздат, Ленинградское отделение
191065. Ленинград, Д-65, Марсово поле, 1

Ленинградская типография № 6 ордена Трудового Красного Знамени
Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой
Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
193144, Ленинград, ул. Моисеенко, 10.